



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL DEL TFG: Comparació entre dades de simulacions numèriques 3D i experimentals en el procés de generació d'un tren gas-líquid en un capil·lar en forma de "T".

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria d'Aeronavegació

AUTOR: Isaac Hernández Monclús

DIRECTOR: Santiago Arias Calderón

CODIRECTORA: Adeline De Villardi De Montlaur

DATA: 24 d'octubre del 2016

Títol: Comparació entre dades de simulacions numèriques 3D i experimentals en el procés de generació d'un tren gas-líquid en un capil·lar en forma de "T".

Autor: Isaac Hernández Monclús

Director: Santiago Arias Calderón

Codirectora: Adeline De Villardi De Montlaur

Data: 24 d'octubre del 2016

Resum

En aquest document s'ha realitzat un estudi per avaluar la viabilitat d'unes simulacions numèriques en 3D sobre un flux bifàsic en condicions de micro-gravetat. Concretament, la mescla d'aire i d'aigua en un capil·lar en forma de T en absència de gravetat. Per tal d'acomplir els nostres objectius hem definit tots els paràmetres per a les simulacions numèriques (entorn d'estudi, fluids, model de simulació...), hem realitzat els tests de convergència a aquells que ho requerien (salt temporal i malla) i hem fet estudis amb l'objectiu d'escollir paràmetres com l'angle de contacte entre el tub i la interfase. Una vegada validades les nostres simulacions hem realitzat l'estudi. En aquest estudi s'ha analitzat la dependència de diferents paràmetres (velocitat de les bombolles, longituds característiques, fracció de volum mitjana d'aire i freqüència de generació) amb la velocitat d'entrada de l'aire. Un cop obtinguts aquests valors característics, els hem comparat amb caracteritzacions teòriques realitzades per altres estudis i amb resultats obtinguts en experiments reals ja publicats.

A partir de tot aquest procediment hem obtingut conclusions en tres àmbits de treball diferents. Primerament, hem aconseguit conèixer i endinsar-nos en el món de les simulacions numèriques i comprovar la importància de l'elecció dels paràmetres. A partir d'aquí hem obtingut uns resultats que ens han portat a concloure quins han sigut els valors i tendències del nostre estudi. I, finalment, podem també argumentar i discutir sobre la comparació realitzada amb les caracteritzacions teòriques i amb els experiments ja realitzats.

Title: Comparison between 3D CFD numerical simulations and experimental data in the gas/liquid train generation process in a micro T-junction

Author: Isaac Hernández Monclús

Director: Santiago Arias Calderón

Codirector: Adeline De Villardi De Montlaur

Date: October 24th 2016

Overview

This document has been a study of the feasibility of a 3D numerical simulation on a two-phase flow in micro-gravity conditions. Specifically, the mixture of air and water in a T-shaped capillary in the absence of gravity. To accomplish our goals we have set all the parameters for numerical simulations (studio environment, fluids, simulation model...), we have performed tests of convergence for those who required it (temporary jump, mesh) and we have done studies to choose parameters such as the angle of contact between the tube and the interface. Once validated our simulations we performed the study. In this study we analysed the dependence of different parameters (velocity of the bubbles, characteristic lengths, average air volume fraction and frequency generation) with the velocity of the air. Once obtained these characteristic values, we have compared them with theoretical characterizations done by other studies and with results of actual experiments already published.

From everything we have achieved in this procedure we have obtained conclusions in three different areas of work. First, we have managed to discover and delve into the world of numerical simulations and check the importance of the choice of parameters. From there we obtained results that have led us to conclude what were the values and trends of our study. And finally, we can also argue and discuss the comparison made with the theoretical characterizations and with the experiments already carried out.

A la meva família per la seva dedicació i suport, als meus amics del barri per saber com animar-me en els moments de menys ànims i al meu tutor per la oportunitat que m'ha donat.

ÍNDEX

0	INTRODUCCIÓ	1
1	METODOLOGIA	2
1.1	Programa CFD	2
1.2	Descripció de l'entorn 3D	3
1.3	Fluids	3
1.4	Règims de treball	4
1.4.1	Nombre de Bond (determinació del nivell de gravetat)	4
1.4.2	Nombre de Weber (determinació del règim de les bombolles)	4
1.4.3	Nombre de Reynolds (determinació del tipus de flux)	4
1.5	Condicions de contorn	4
1.6	Velocitats	5
1.7	Monitors	5
1.8	Malla	6
1.9	Models de simulació	7
2	VALIDACIONS	9
2.1	Tests de convergència	9
2.1.1	Malla	9
2.1.2	Salt temporal	14
2.2	Angle de contacte	17
3	RESULTATS	21
3.1	Velocitat de la bala d'aire	22
3.2	Fracció de volum del gas	23
3.3	Freqüència de generació	24
3.3.1	Escala de la transició	25
3.3.2	Velocitat superficial del gas en el punt de transició	25
3.3.3	Freqüència de saturació	25
3.3.4	Pendent inicial de la fase lineal	25
3.4	Longituds característiques	26
3.4.1	Longitud de la cel·la unitat	27
3.4.2	Diàmetre equivalent de la bala d'aire	28
3.4.3	Longitud de la bala d'aire	29
3.4.4	Longitud de la bala d'aigua	30
3.5	Taula caracteritzacions	31
4	COMPARACIÓ DELS RESULTATS	33
4.1	Velocitat de la bala d'aire	34

4.2	Fracció de volum d'aire mitjana.....	35
4.3	Freqüència de generació.....	36
4.4	Longituds característiques	38
4.4.1	Longitud de la cel·la unitat.....	38
4.4.2	Longitud de la bala d'aire	39
4.4.3	Longitud de la bala d'aigua	40
5	CONCLUSIONS	41
6	BIBLIOGRAFIA	43
7	ANNEX 1. Codi <i>MATLAB</i>.....	46

0 INTRODUCCIÓ

Durant les últimes dècades, el nombre d'eines i d'aplicacions requerides per a missions espacials ha patit un gran augment. Gran quantitat d'experiments i anàlisis són portats a terme avui en dia a l'espai; els quals necessiten d'una gran quantitat de preparació i d'eines específiques per tal de poder-se du a terme. Degut a això, moltes millores s'estan estudiant per tal d'assistir i millorar l'equipament de les missions espacials.

Un d'aquests canvis que podria aportar una gran millora tant en pes com en funcionament en sistemes com els de suport vital o els de propulsió és el canvi d'un flux monofàsic per un flux bifàsic. En el nostre cas estudiarem un flux bifàsic gas-líquid. Aquests nous sistemes necessiten d'un coneixement més profund per tal de poder implementar-se en condicions de micro-gravetat.

En aquestes condicions de micro-gravetat els fenòmens que succeeixen al mesclar aire amb gas són completament diferents. Tots ens podem imaginar una bombolla d'aire dins d'un líquid amb l'efecte de la gravetat. Però, amb l'absència de la gravetat la força de flotabilitat de les bombolles perd importància i les bombolles no es generen amb una forma regular, sinó tot el contrari.

Degut a la importància de l'estudi de la interfase dels dos fluids del flux, en aquest document es proposa un estudi d'un generador d'un tren de bombolles d'aire en aigua en condicions de micro-gravetat. Aquesta configuració que estudiarem ja ha estat proposada abans per altres estudis de Carrera [7]. Es tracta d'unir un capil·lar pel que circula líquid i un capil·lar pel que hi circula el gas de manera perpendicular com la Figura 0.1 mostra.

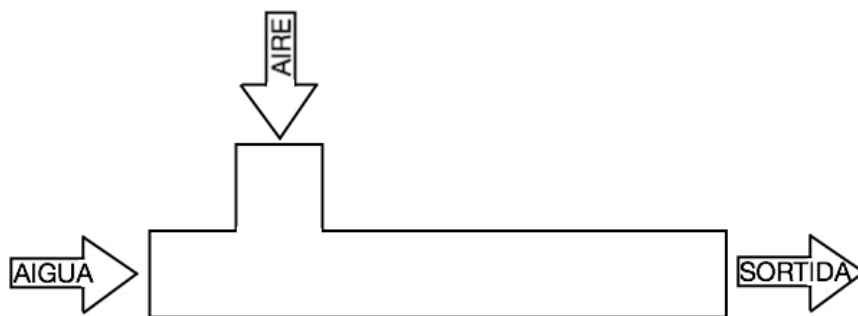


Fig 0.1. Esquema representatiu de la configuració proposada per Carrera [7].

Les bombolles són generades per la competició de forces en el capil·lar, ja que són predominants sobre les forces inercials i de flotabilitat. Aquest mètode proporciona una gran possibilitat de mida per a les bombolles, però, oferint una dispersió en diàmetre entre bombolles molt petita i fent-les gairebé insensibles al nivell de gravetat. El punt clau d'aquest mètode és que no només pots

injectar bombolles d'aire on vulguis sinó que ja pots injectar un tren de bombolles d'aire i líquid periòdic a una altra cavitat o contenidor directament.

En aquest treball ens centrarem en l'estudi del cas contrari. Injectarem el líquid per un capil·lar perpendicular pel qual el gas ja està circulant, és a dir, intercanviarem les entrades de líquid i de gas en la "T".

Fins a dia d'avui nombrosos mètodes Computacionals de Dinàmica de Fluids (CFD per les seves sigles angleses de "*Computational Fluid Dynamics*") s'han fet servir per tal d'estudiar el comportament d'aquestes tecnologies mitjançant simulacions. En aquest document s'ha fet servir un programa comercial de CFD per tal d'estudiar-les.

Concretament, presentem un estudi sobre la viabilitat d'unes simulacions ja utilitzades per a altres configuracions com en el treball realitzat per Rezkallah [3] per a estudiar els fluxos obtinguts amb el generador de bombolles en diferents règims operatius. Per tal d'aconseguir aquests objectiu realitzarem una sèrie de simulacions i compararem els seus resultats amb resultats experimentals ja publicats de la mateixa configuració per Arias [1][6] per tal de validar les simulacions i proposar possibles millores.

La comparació dels resultats serà a través de la caracterització del comportament de les bombolles a partir de diferents factors com són: la seva velocitat, la seva freqüència de generació, la fracció de volum mitjana d'aire i algunes de les seves longituds característiques. Aquests factors serviran per trobar tendències que ens ajudin a descriure els fenòmens que succeeixen amb els fluxos.

Pel que fa a la distribució del document, començarem amb una breu explicació dels paràmetres implicats en les simulacions del fenomen. Tot seguit continuarem amb una explicació dels tests de convergència que hem realitzat i dels paràmetres que s'ha decidit triar per realitzar l'estudi. Amb aquests paràmetres ja validats podrem començar a realitzar les diferents simulacions de les que constarà el cos del treball, variant les velocitats d'entrada del gas, i obtindrem una sèrie de tendències i valors. Podrem comparar-les amb caracteritzacions teòriques ja realitzades per Arias [5] i amb dades experimentals d'estudis ja realitzats en els treballs de Arias [1][6], de les quals podrem extreure les diferents conclusions amb les que finalitzarà el document.

1 METODOLOGIA

En aquest capítol descriurem cadascun dels paràmetres de la simulació i de les variables a estudiar, així com la manera en la que obtindrem els resultats.

1.1 Programa CFD

Totes les simulacions numèriques han sigut realitzades amb un programa comercial Computacional de Dinàmica de Fluids (CFD per les seves sigles

angleses de “*Computational Fluid Dynamics*”), “*ANSYS Fluent v16.2 Academic*”.

1.2 Descripció de l'entorn 3D

El nostre entorn tridimensional constarà d'un cilindre o capil·lar horitzontal de 10mm de longitud i 1mm de diàmetre pel qual hi circula el gas. En aquest capil·lar, a 1mm de l'entrada del gas hi ha un altre capil·lar perpendicular d'1mm de longitud i 1mm de diàmetre pel qual entra el líquid.

L'eix de coordenades està situat de tal manera que l'entrada de gas està situada en el pla $x=0$ i creix en direcció al capil·lar, la paret horitzontal oposada a l'entrada d'aigua és el pla $y=0$ i creix en direcció a l'entrada d'aigua i que el pla de simetria és el pla $z=0$. La Figura 1.1 mostra un esquema en 3D del sistema i l'eix de coordenades.

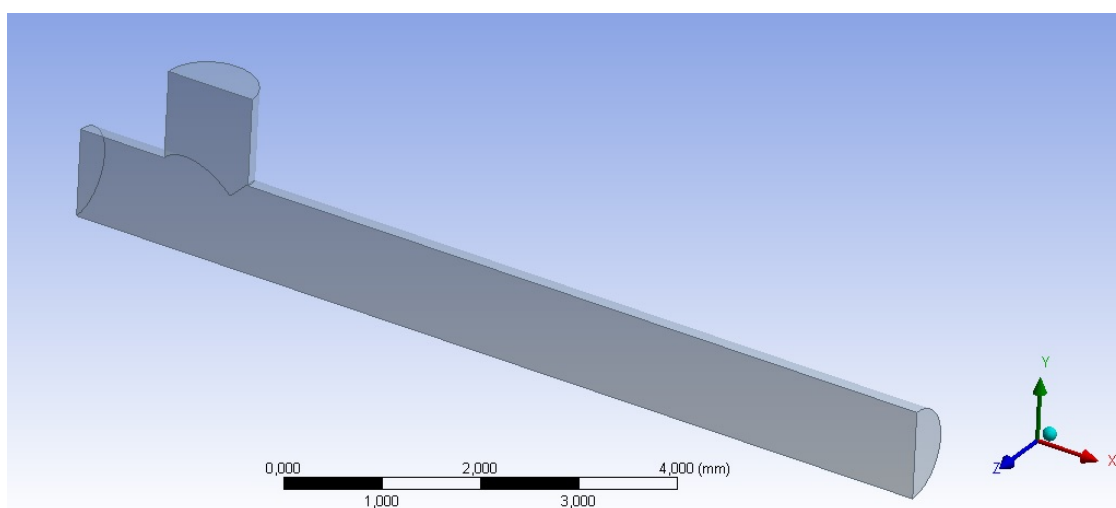


Fig 1.1. Esquema representatiu del nostre entorn d'estudi.

1.3 Fluids

Els dos fluids escollits per realitzar l'estudi i representar el líquid i el gas seran dos dels més comuns que hi ha en el nostre entorn, com són l'aigua (en estat líquid) i l'aire, respectivament (incompressibles, isotèrmics i a una temperatura constant de 25°C). La Taula 1.1 ens mostra la viscositat i la densitat dels dos materials i la tensió superficial entre ells a la interfase per a l'estudi.

Material	Densitat (ρ) [kg/m ³]	Viscositat (μ) [kg/m·s]
Aigua (líquida)	998.2	$1.003 \cdot 10^{-3}$
Aire	1.225	$1.7894 \cdot 10^{-5}$
Tensió superficial interfase (σ) [N/m]		0.072

Taula 1.1. Propietats dels fluids.

1.4 Règims de treball

1.4.1 Nombre de Bond (determinació del nivell de gravetat)

D'acord amb el nombre de Bond, la gravetat juga un paper menor que la tensió superficial en la formació de les bombolles ($Bo = (\rho_L - \rho_G)g\phi_c^2/\sigma = 0.136$, on g , ϕ_c , ρ_G i ρ_L són l'acceleració de la gravetat, el diàmetre del capil·lar, la densitat del gas i la densitat del líquid respectivament). La qual cosa indica que el nostre experiment és independent al nivell de gravetat que existeix. Això fa que per al nostre flux, les forces de gravetat siguin considerades igual a zero.

1.4.2 Nombre de Weber (determinació del règim de les bombolles)

En les condicions de l'experiment, la formació de les bombolles és conseqüència de la competició entre les forces del capil·lar i les forces de resistència del líquid. Aquesta competició, pot ser avaluada pel nombre de Weber ($We_G = \rho_G\phi_c U_G^2/\sigma$, on U_G és la velocitat de les bombolles pel capil·lar que obtindrem finalment com a un dels resultats d'aquest estudi). Les forces del capil·lar sobrepassen les forces inercials quan s'acompleix el criteri $We_G < 2$ segons Rezkallah [3]. Això indica que en la nostra configuració la formació de les bombolles és conseqüència de les forces del capil·lar majoritàriament. El rang de velocitats d'entrada utilitzat en aquest estudi permetrà obtenir velocitats de bombolla idònies per a treballar en aquestes condicions (basat en resultats experimentals ja existents [1][6]). Més endavant, en el Capítol 3 (Resultats) ja s'explicarà quins nombres de Weber s'aconsegueixen durant els experiments.

1.4.3 Nombre de Reynolds (determinació del tipus de flux)

El nombre de Reynolds expressat com $Re = \rho_G\phi_c U_G/\mu_G$ (on μ_G és la viscositat del gas), defineix el caràcter del flux. Un nombre de Reynolds menor a 2100 descriu un flux laminar. Per tant, el nostre experiment serà considerat en condicions laminars si el nombre de Reynolds per totes les nostres velocitats és menor a 2100. El nombre de Reynolds per al nostre experiments oscil·larà entre 28 i 54. La qual cosa indica que el rang de velocitats d'entrada utilitzat en aquest estudi permetrà obtenir unes condicions idònies per a treballar en condicions laminars.

1.5 Condicions de contorn

Pel que fa a les entrades d'aire i d'aigua, les dues entrades estan definides com a entrades de velocitats, és a dir, els fluxos estan definits amb uns vectors velocitat normals al pla que forma l'entrada. Una pressió operativa de 101325Pa està definida prop de l'entrada d'aire, és a dir, en un punt on sempre hi haurà només aire. Per la seva banda, la sortida està definida com una sortida de pressió.

Per últim, les parets dels capil·lars són estacionaries i no hi ha lliscament entre les parets i els fluids. A més a més, existeix un angle de contacte entre la paret i la interfase que defineix el vector normal a la superfície per les cel·les properes a la paret. Aquest angle de contacte serà un dels altres punts a estudiar en el Capítol 2 (Validacions).

1.6 Velocitats

Al llarg del treball les velocitats d'entrada al capil·lar del gas i del líquid seran nombrades com U_{SG} i U_{SL} respectivament. U_{SL} serà constant al llarg de tot el treball (0.318m/s) ja que volem estudiar i comparar la influència de la velocitat d'entrada del gas amb els resultats experimentals. Pel que fa a U_{SG} , anirà variant per tal d'estar sempre en el rang de règims i condicions explicat abans i poder obtenir diferents relacions. El rang de U_{SG} serà entre 0.059m/s i 0.359m/s.

1.7 Monitors

Per tal d'obtenir els resultats de les simulacions hem col·locat dos monitors, un al pla $x=7mm$ i un al pla $x=8mm$. Tots dos obtindran la fracció de volum d'aire en funció del temps de simulació. Del pla $x=8mm$ obtindrem la longitud de les bombolles d'aire (L_G), la longitud de la cel·la unitat (L_{CU}) i la freqüència d'aquestes (f_G), mentre que de la combinació de tots dos plans obtindrem la velocitat de les bombolles (U_G). Els plans estan col·locats en aquestes posicions perquè estiguin a una distància suficient de les entrades com per què les bombolles ja s'hagin estabilitzat i no hi hagi fluctuacions pròpies de la seva formació i a més a més, aquesta distància també sigui la suficient amb la sortida per què els fenòmens que hi poden succeir no afectin a les mesures.

La velocitat de les bombolles l'obtindrem coneixent el temps que triguen les bombolles en recórrer el mil·límetre que hi ha entre tots dos monitors. A partir d'aquesta dada extraurem la longitud de les bombolles i la longitud de la cel·la unitat coneixent també el temps que triguen tant la bombolla com la cel·la unitat en creuar el monitor del pla $x=8mm$. Per últim, la freqüència la mesurarem mesurant el temps que hi ha entre l'entrada al monitor de dues bombolles consecutives. La Figura 1.2 mostra els valors que obtindrem en cadascun dels monitors i exemplifica com obtindrem les mesures.

Per tal de realitzar aquest anàlisi s'ha creat un codi de "MATLAB" dissenyat específicament per analitzar aquestes dades. A l'annex 1 es mostra una còpia íntegra del programa utilitzat per tal d'analitzar aquestes mesures.

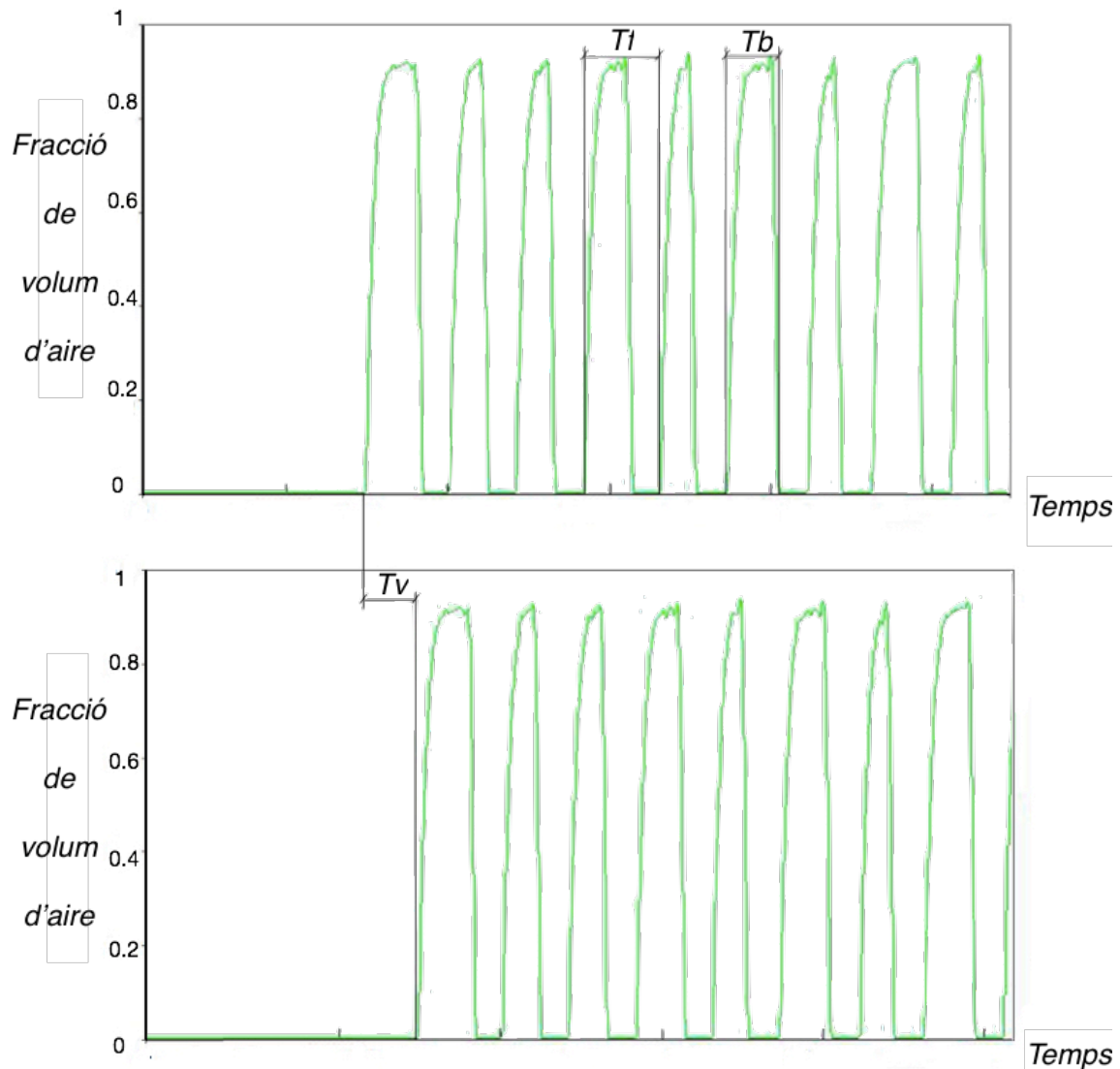


Fig 1.2. Obtenció de dades a partir de la fracció de volum d'aire.

1.8 Malla

El nostre programa per tal de poder modelar els dos fluids i resoldre la simulació necessita transformar l'entorn tridimensional en un conjunt de nodes i figures geomètriques, és a dir una malla. S'ha utilitzat una distribució de malla ja utilitzada per a altres configuracions com en el treball de Rezkallah [3]. Considerant els nostres capil·lars des de les parets del tub cap endins, primerament, el cos està format per una capa d'hexaedres i més cap a l'interior està format per tetraedres. La Figura 1.3 mostra una secció circular del capil·lar on es poden apreciar les diferents figures geomètriques per les quals està formada la malla. Més endavant, en el Capítol 2 (Validacions) es parlarà sobre les mides de les figures geomètriques per a les simulacions. Això serà un factor determinant en les simulacions ja que de la finesa de la malla dependrà la precisió de les simulacions.

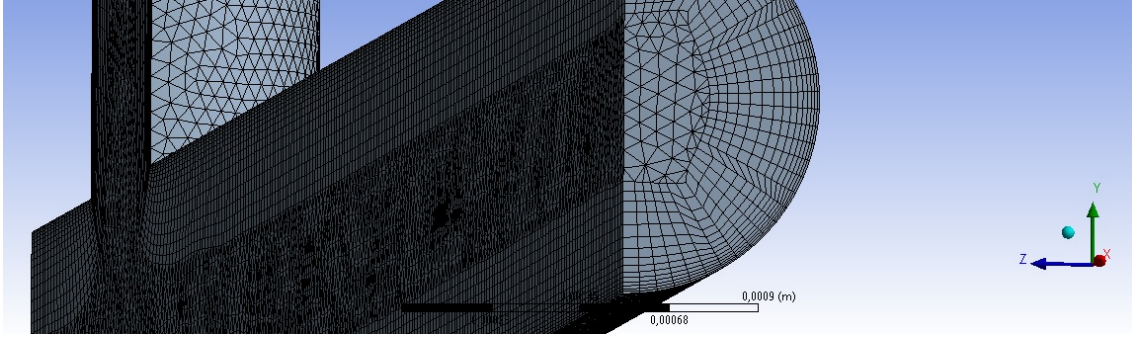


Fig 1.3. Secció circular de la malla.

1.9 Models de simulació

En el model utilitzat, les diferents fases són tractades matemàticament com compenetrades contínues, és a dir, el volum d'una fase no pot ocupar el d'una altra fase. La fracció de volum pren importància en aquest punt, sent condició que la suma de les fraccions de volum de les dues fases ha de ser igual a 1.

El mètode Volum de Fluids (VOF per les seves sigles angleses de “*Volume of Fluids*”) és un model que permet seguir una superfície dins d'una malla. Ha sigut dissenyat per dos o més fluxos immiscibles on la posició de la interfase és d'interès. El seguiment de la interfase es realitza a través de la resolució de l'equació de la continuïtat per la fracció de volum d'una de les fases (fase secundària). Per la fase secundària q , l'equació té la següent forma segons el manual d'usuari d'ANSYS [2]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{d}{dt} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q U_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1.1)$$

on α_q , U_q i ρ_q són la fracció de volum, la velocitat i la densitat de la fase q respectivament, \dot{m}_{pq} és la transferència màssica de la fase p a la fase q i \dot{m}_{qp} és la transferència màssica de la fase q a la fase p . Per la fase primària p no es resoldrà l'equació de la fracció de volum un altre cop, sinó que s'utilitzarà la restricció ja comentada segons el manual d'usuari d'ANSYS [2]:

$$\sum_{p=1}^n \alpha_p = 1 \quad (1.2)$$

on α_p és la fracció de volum de la fase p . En cada localització de la malla és coneguda la fracció de volum, fent que aquesta propietat ens indiqui si es tracta d'una fase, d'una altra o d'una barreja de totes dues (interfase). Basat en la

fracció de volum, les propietats i variables són assignades a aquesta localització de la malla.

La formulació que s'ha utilitzat és explícita, és a dir, que els esquemes d'interpolació que calculen la fracció de volum utilitzen només els valors calculats en l'instant de temps previ. L'esquema escollit per la interpolació és el PRESTO! (per les seves sigles angleses "*PREssure STaggering Option*"). Aquest esquema escalona la malla generant noves cel·les amb els centres en les cares de les cel·les originals segons el manual d'usuari d'ANSYS [2]. La Figura 1.4 mostra com l'esquema PRESTO! genera dues noves cel·les.

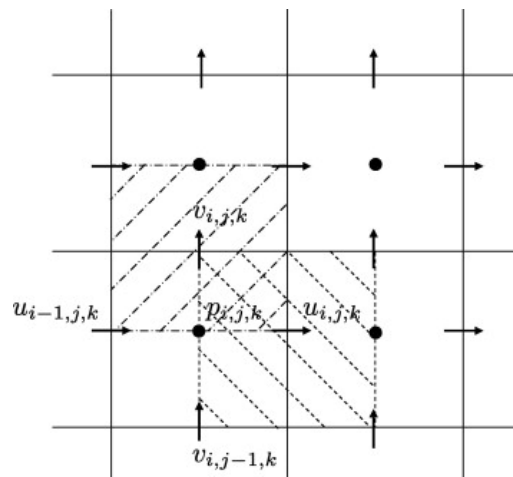


Fig 1.4. Generació de noves cel·les amb l'esquema PRESTO! segons el manual d'usuari d'ANSYS [2].

Per a la discretització espacial de la fracció de volum s'ha utilitzat un esquema de reconstrucció geomètrica, que representa la interfase utilitzant trossos lineals. La Figura 1.5 mostra com discretitza l'esquema de reconstrucció geomètrica. Com es pot observar en cada cel·la converteix la corba en una recta.

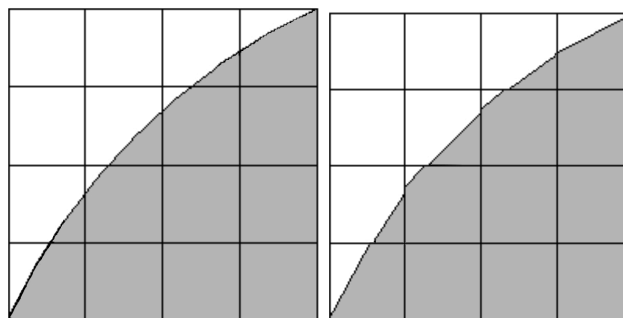


Fig 1.5. Discretització espacial amb reconstrucció geomètrica segons el manual d'usuari d'ANSYS [2].

2 VALIDACIONS

Un cop definida la metodologia que seguirem durant les simulacions, procedirem a validar els diferents paràmetres dels que dependrà l'exactitud de les simulacions. Per realitzar aquesta validació haurem de realitzar uns tests de convergència. Els paràmetres dels quals realitzarem aquests tests són:

1. El nombre d'elements de la malla.
2. El salt de temps en la discretització temporal, és a dir, el temps que hi ha entre un càlcul i el següent.

Per acabar amb aquest capítol de validacions, finalment, decidirem amb quin angle de contacte entre el tub i la interfase es realitzarà l'experiment.

2.1 Tests de convergència

Per realitzar els tests de convergència hem realitzat el mateix procediment en els dos cassos. Basant-nos en publicacions anteriors d'altres configuracions [3], hem extret els valors dels dos paràmetres que creiem que seran els adequats per tal de portar el nostre experiment a bon port. Un cop hem escollit aquest nombre d'elements i aquest salt temporal, procedirem a realitzar simulacions variant aquests valors per tal d'extreure la dependència que té l'experiment d'ells. Per tal de realitzar l'experiment es deixarà arrencar la simulació i s'esperarà fins aproximadament la novena bombolla amb l'objectiu de deixar convergir la simulació. Per estudiar aquesta dependència s'analitzaran tres paràmetres independents com són: la freqüència de les bombolles, la seva velocitat i la seva longitud.

2.1.1 Malla

La malla escollida ha estat implantada igual que en els treballs realitzats per Rezkallah [3]. Dita malla té 413000 elements. I, definint la malla en sentit de les parets del tub fins al centre, està estructurada, primerament, amb una inflació de 15 capes amb figures hexaèdriques. La primera de les quals té 0,005mm. Seguidament, els tetraedres centrals tenen una mida de cos de 0,045mm.

Per realitzar els tests de convergència s'ha estudiat els cassos de la malla escollida (413000 elements), d'una malla gruixuda (260000 elements) i d'una malla fina (502000 elements). La variació del nombre d'elements de la malla s'ha aconseguit variant el nombre de capes i el gruix de la primera d'elles en la inflació i variant la mida de cos dels tetraedres. La malla sempre ha estat distribuïda geomètricament de la mateixa manera, és a dir, a la part exterior capes d'hexaedres i a la part interior tetraedres.

Per realitzar aquests tests s'han utilitzat les mateixes velocitats de referència ($U_{SL} = 0.318m/s$ i $U_{SG} = 0.267m/s$) en totes les configuracions de malla. El salt de temps sempre ha estat, també, constant ($\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}s$). Pel que fa a l'angle

de contacte, tant en el capil·lar vertical com en el capil·lar horitzontal, sempre ha estat fixat a 0° en totes aquestes simulacions.

En aquest test, hem hagut d'esperar fins a la setena bombolla en les tres configuracions per esperar a la convergència de la simulació. Això és degut a què en el cas de la malla fina al haver-hi tants elements, al avançar la simulació més enllà de la setena bombolla, el nombre de Courant sobrepassava 250.

El nombre de Courant és el quocient entre l'interval de temps (Δt) i el temps de residència en un volum finit. Pot ser calculat com:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (2.1)$$

A l'expressió, u és la velocitat característica i Δx és l'interval d'espai de la malla. En matemàtiques, és una condició de convergència d'equacions diferencials en derivades parcials segons Courant [4]. Això indica, per al cas de la malla fina, que el pas de temps és massa gran per la finesa de la malla i la simulació a partir de la setena bombolla pot deixar de ser fiable. Això fa que estudiem la convergència fins a la setena bombolla.

La Figura 2.1 mostra la velocitat de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot observar totes tres tendències són molt similars, ja que els valors de velocitat per les bombolles són molt constants al llarg de la convergència (valors sobre 0.66m/s). També, es pot apreciar com la tendència de la malla fina i la malla escollida són bastant similars, mentre que la malla gruixuda si que oscil·la una mica més. Aquest factor pot ser degut a la menor precisió d'aquesta última malla.

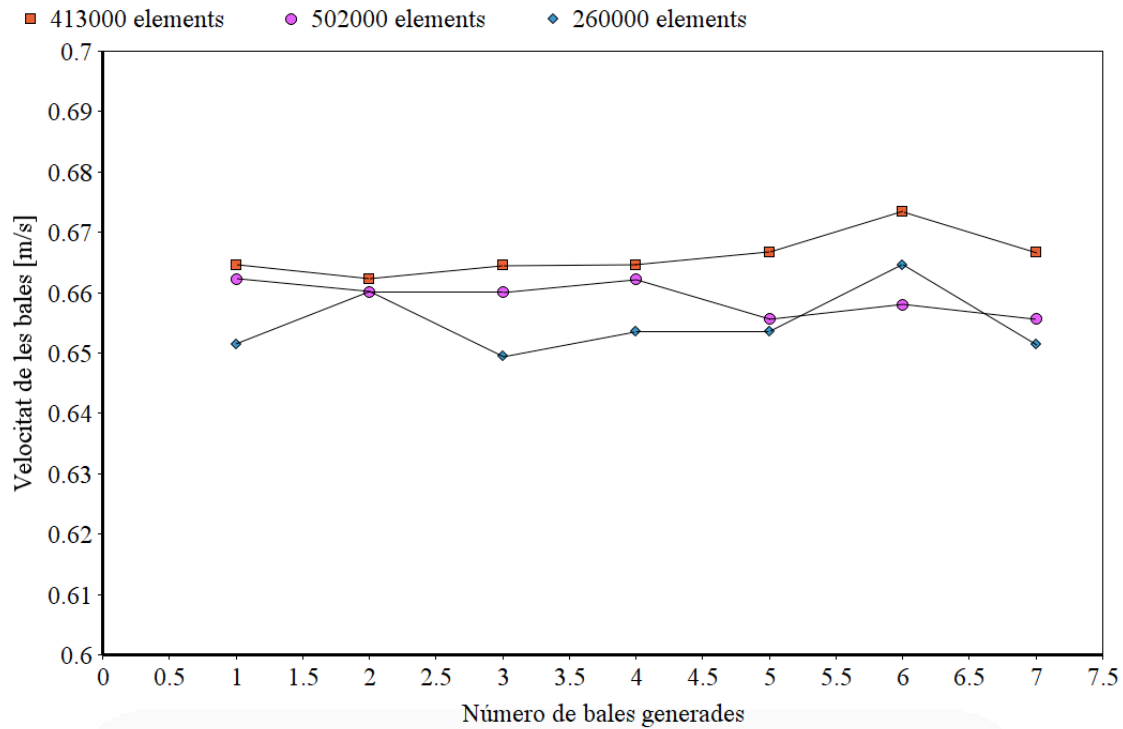


Fig 2.1. Velocitat de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.2 mostra la freqüència de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Cal dir que, al necessitar dues bombolles per extreure un valor de freqüència, hi ha un valor menys de freqüència que en el cas anterior de velocitats.

Com es pot observar les tres tendències oscil·len. Essent un altre cop la malla gruixuda la que divergeix més a les altres dues degut a la falta de precisió. També, es pot apreciar com la tendència de la malla fina i la malla escollida són molt semblants un altre cop. Aquestes dues configuracions tenen una freqüència que oscil·la durant la simulació entre uns 200 i uns 275Hz.

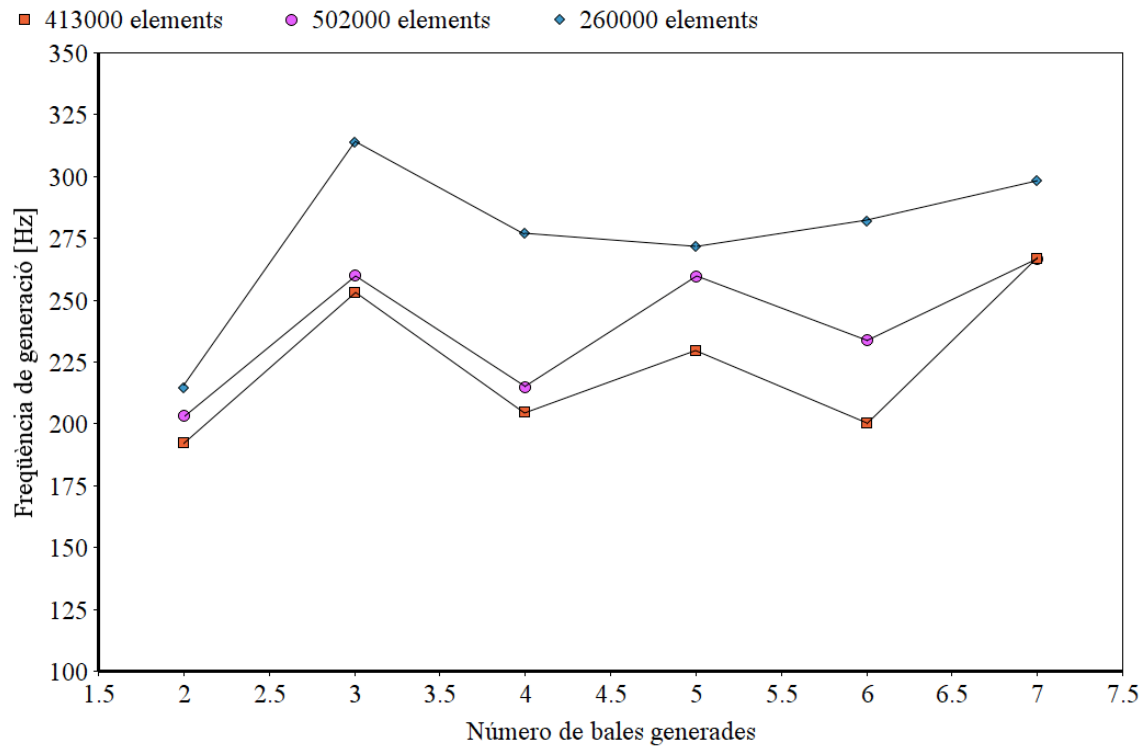


Fig 2.2. Freqüència de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.3 mostra la longitud de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot observar la malla gruixuda és la que divergeix més de les altres. També, es pot apreciar com la tendència de la malla fina i la malla escollida són molt similars, al igual que en els anteriors casos. La malla escollida oscil·la més que la malla fina en aquest cas, però al final els valor convergeixen amb els de la malla fina.

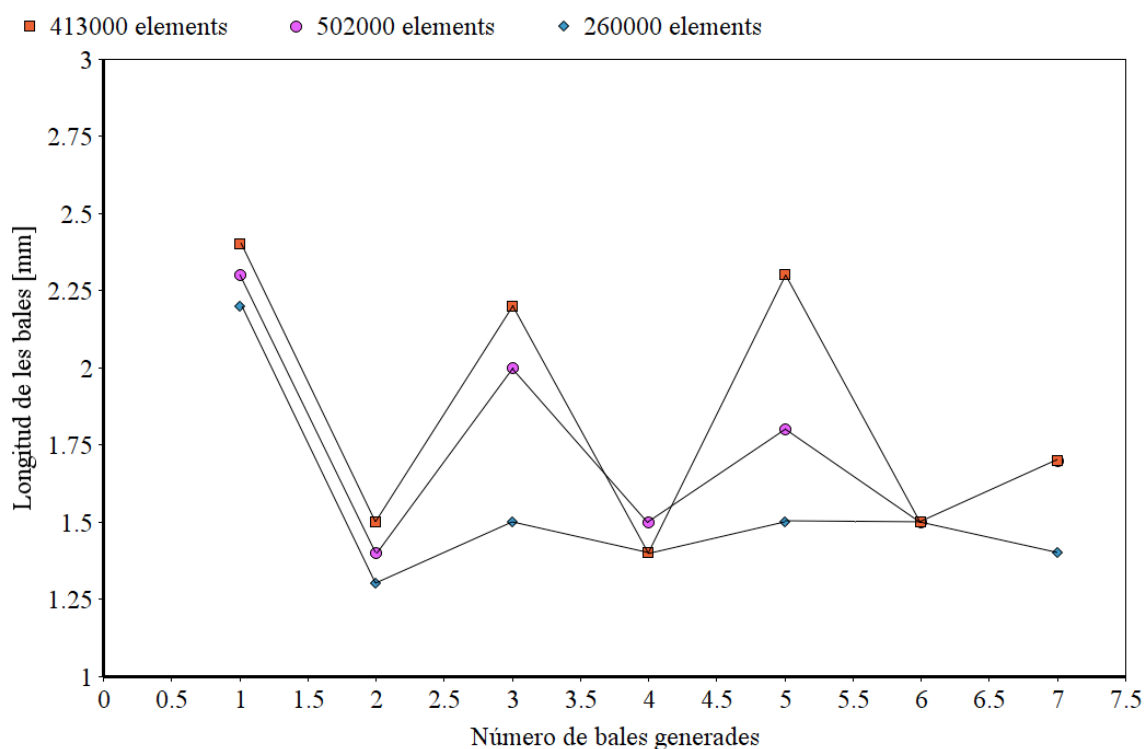


Fig 2.3. Longitud de les bales en funció del número de bales generades.

Un cop analitzades les tendències anem a analitzar els errors amb les simulacions ja convergides i estabilitzades, és a dir, els valor de la setena bombolla. La Taula 2.1 mostra els valors de freqüència, velocitat i longitud de l'última bombolla per a cada una de les simulacions i el seu error respecte a la malla fina.

Malla (elements)	f_G (Hz)	Error f_G (%)	U_G (m/s)	Error U_G (%)	L_G (mm)	Error L_G (%)
502000	266.67	-	0.6557	-	1.652	-
413000	266.67	0	0.6667	1.68	1.697	2.72
260000	298.06	11.77	0.6515	0.64	1.443	12.65

Taula 2.1 Valors obtinguts en el test de convergència de la malla

Com es pot observar a la Taula 2.1 l'error entre la malla escollida i la malla més fina és sempre menor al 3%. Una altra observació possible és que els valors de la malla més gruixuda si que s'allunyen una mica del valors de la malla fina, però sempre dins d'uns valors prudents. La dada que també cal destacar és que, per al cas de la velocitat de bombolla, l'error amb la malla gruixuda si que és menor al de la malla escollida. Aquest fenomen pot ser explicat amb el fet de que els valors de velocitat són molt constants al llarg de la simulació i varien molt poc els valors entre les diferents simulacions.

Al comprovar que l'error entre la malla escollida i una malla més fina és sempre menor al 3% quan l'experiment ja ha convergit, podem afirmar que la malla escollida de 413000 elements ja està validada i serà la malla que utilitzarem per realitzar l'experiment final.

2.1.2 Salt temporal

El salt temporal escollit al qual se li realitzarà el test de convergència és de $5 \cdot 10^{-6} s$. Per realitzar els tests de convergència s'ha estudiat els cassos del salt de temps escollit ($5 \cdot 10^{-6} s$), d'un salt temporal gran ($1 \cdot 10^{-5} s$) i d'un salt temporal petit ($2.5 \cdot 10^{-6} s$). Per realitzar aquests tests s'han utilitzat les mateixes velocitats de referència ($U_{SL} = 0.318 m/s$ i $U_{SG} = 0.267 m/s$) en totes les configuracions de temps. Els elements de la malla sempre han estat, també, constants (413000 elements). Pel que fa a l'angle de contacte, tant en el capil·lar vertical com en el capil·lar horitzontal, sempre ha estat fixat a 0° en totes aquestes simulacions.

La Figura 2.4 mostra la velocitat de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot observar totes tres tendències són molt similars, ja que els valors de velocitat per les bombolles són molt constants al llarg de la convergència (valors sobre $0.66 m/s$). També, es pot apreciar com la tendència del temps petit i el temps escollit són bastant similars, mentre que el temps gran si que oscil·la una mica més a la vuitena bombolla. Aquest factor pot ser degut a la menor precisió d'aquesta última simulació.

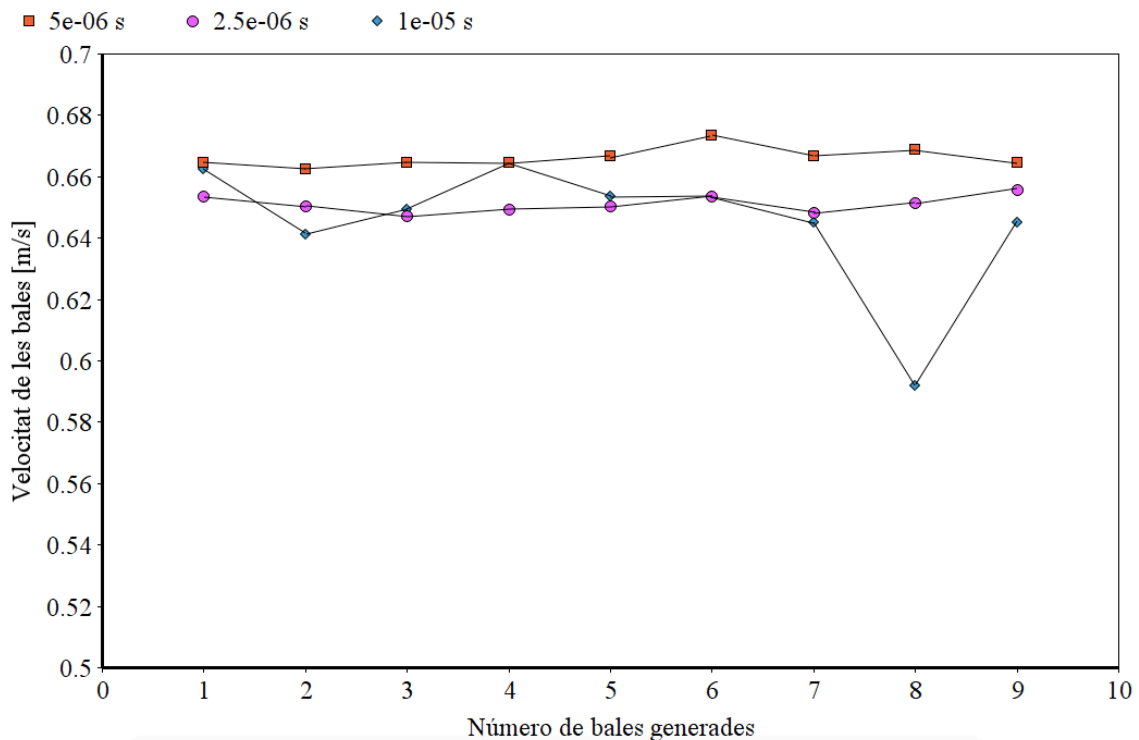


Fig 2.4. Velocitat de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.5 mostra la longitud de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot observar el temps escollit oscil·la menys que el temps petit en aquest cas, però al final els valors acaben convergint. Per la seva banda, el temps gran continua oscil·lant al revés de tots dos casos.

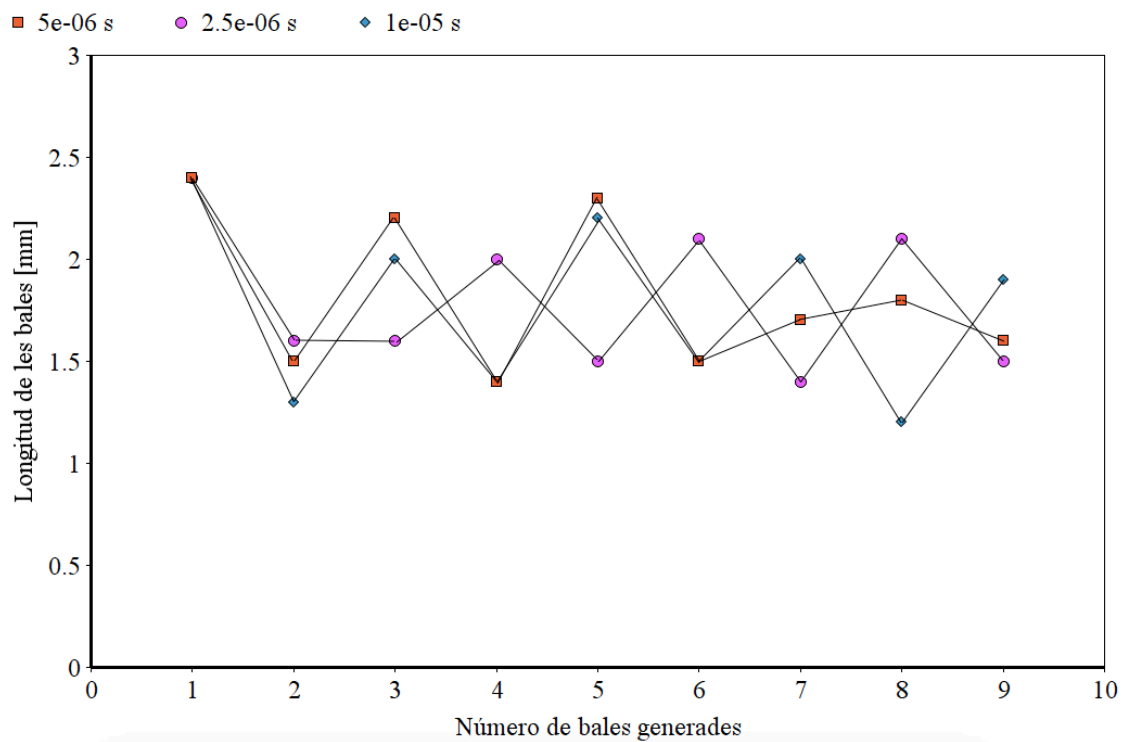


Fig 2.5. Longitud de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.6 mostra la freqüència de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Cal dir que, al necessitar dues bombolles per extreure un valor de freqüència, hi ha un valor menys de freqüència que en el cas anterior de velocitats.

Com es pot observar les tres tendències oscil·len. Aquesta oscil·lació és deguda a les mínimes variacions en les longituds de les bombolles, ja que al variar la mida de les bombolles, variarà la freqüència de generació.

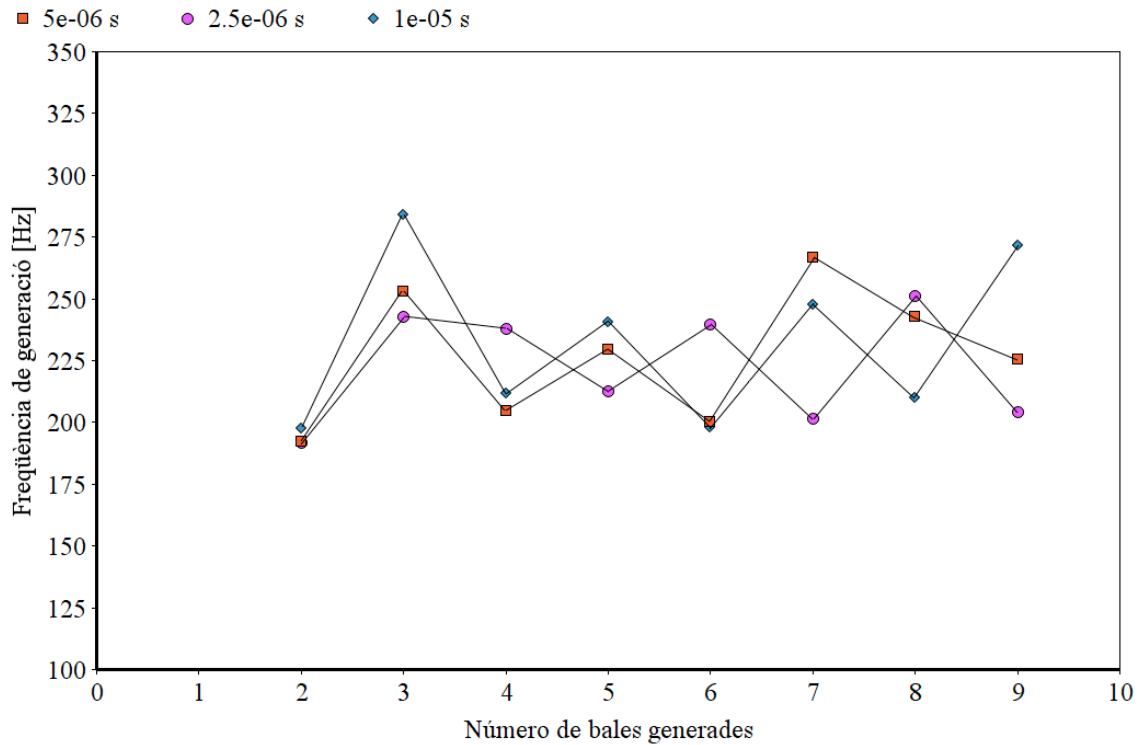


Fig 2.6. Freqüència de les bales en funció del número de bales generades.

Un cop analitzades les tendències anem a analitzar els errors amb les simulacions ja convergides i estabilitzades, és a dir, els valor de la novena bombolla. La Taula 2.2 mostra els valors de freqüència, velocitat i longitud de l'última bombolla per a cada una de les simulacions i el seu error respecte al pas de temps petit.

Salt temporal Δt (s)	f_G (Hz)	Error f_G (%)	U_G (m/s)	Error U_G (%)	L_G (mm)	Error L_G (%)
$2,5 \cdot 10^{-6}$	204.98	-	0.6557	-	1.530	-
$5 \cdot 10^{-6}$	225.29	9.91	0.6645	1.34	1.581	3.33
$1 \cdot 10^{-5}$	271.74	32.57	0.6452	1.59	1.922	25.6

Taula 2.2 Valors obtinguts en el test de convergència del salt temporal

Com es pot observar a la Taula 2.2 l'error entre el salt temporal escollit i el salt petit és sempre menor al 10%. Una altra observació possible és que els valors del temps més gran si que s'allunyen una mica del valors del temps petit. Una dada a destacar és l'augment en l'error respecte al test de la malla, aquest factor demostra que la discretització temporal és un dels punts delicats en la nostra simulació. Degut al temps de processament de les nostres simulacions

durem a terme els experiments amb aquest salt temporal, però tenint en compte que podem cometre un error de fins al 10%.

2.2 Angle de contacte

L'angle de contacte és l'angle entre la paret del tub i la tangent a la interfase del flux. Amb l'objectiu de definir-lo cal que dividim el nostre cos en dos parets diferents. La paret horitzontal (capil·lar llarg de 10mm) i la paret vertical (capil·lar curt d'1mm). En la paret vertical l'angle de contacte no afectarà a l'experiment ja que en aquell capil·lar tan sols hi ha aigua i no existeix interfase. Per altra banda, en la paret horitzontal hem de definir diversos valors d'angle per tal de triar el pertinent per a la simulació.

Per realitzar aquests tests s'han utilitzat les mateixes velocitats de referència ($U_{SL} = 0.318m/s$ i $U_{SG} = 0.267m/s$) en totes les simulacions. El salt de temps sempre ha estat, també, constant ($\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}s$). La malla escollida per realitzar aquesta validació ha sigut la malla de 413000 elements. Per últim cal dir que s'han realitzat tres experiments amb diferents angles de contacte. Els angles de contacte són 0° , 25° i 90° , essent 0° una condició d'hidrofilia. Un altre cop per tal de deixar convergir la simulació s'ha esperat fins la novena bombolla en els tres casos.

La Figura 2.7 mostra com els diferents angles de contacte fan variar la forma de la bombolla al generar-se. Aquest factor fa que l'angle de contacte en la paret horitzontal prengui gran importància. Com podem observar al augmentar l'angle de contacte fa que la bombolla es generi amb una menor velocitat i menor longitud però amb una freqüència de generació major ja que generarà més bales en el mateix període de temps.

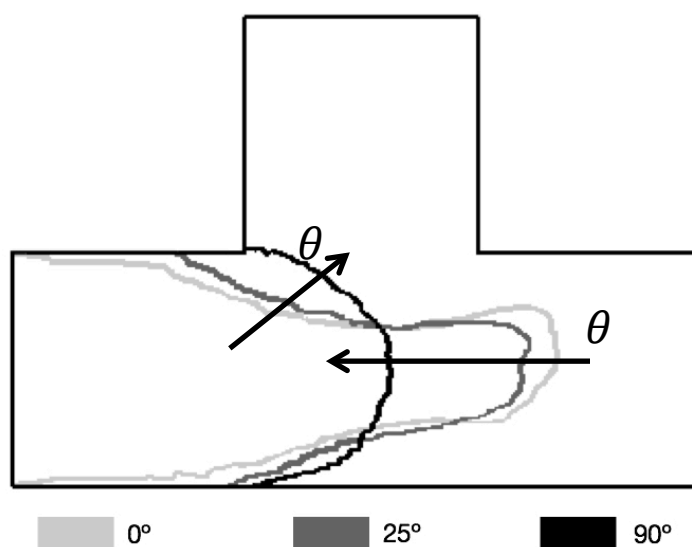


Fig 2.7. Despreniment de la bombolla en funció de l'angle de contacte.

La Figura 2.8 mostra la velocitat de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot apreciar la velocitat pels tres casos té la mateixa tendència. La velocitat sembla anar en augment a mida que disminuïm l'angle de contacte, aquest fenomen és degut a que la bombolla al generar-se surt més estirada i té més flux d'aigua entre ella i la paret. Així doncs, podem observar com a mida que disminuïm l'angle la velocitat de les bombolles és major.

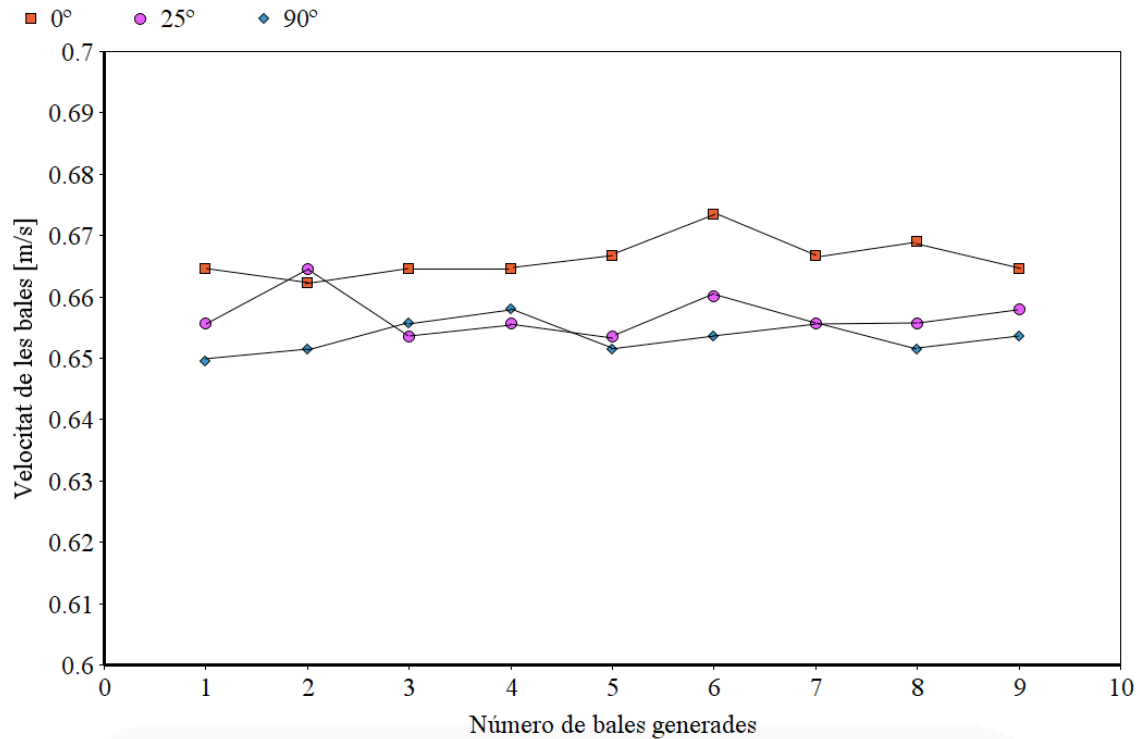


Fig 2.8. Velocitat de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.9 mostra la longitud de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot apreciar la longitud pel cas de l'angle 0° oscil·la més que per als altres dos casos. La longitud sembla anar en augment a mida que disminuïm l'angle de contacte, aquest fenomen és degut a que la bombolla al generar-se surt més estirada i amb una major longitud. Així doncs, podem observar com a mida que disminuïm l'angle la longitud de les bombolles és major.

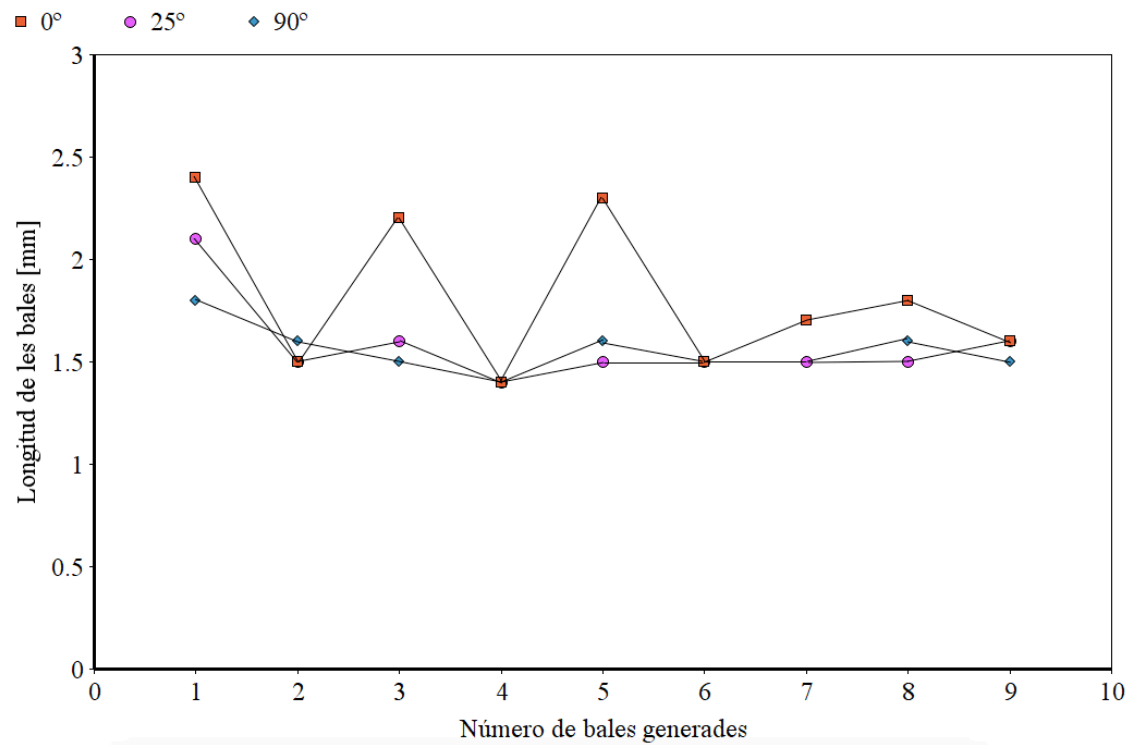


Fig 2.9. Longitud de les bales en funció del número de bales generades.

La Figura 2.10 mostra la freqüència de les bombolles per les tres simulacions en funció del nombre de bombolla que estem estudiant (sent la bombolla número 1 la primera en generar-se). Com es pot apreciar la freqüència pel cas de l'angle 0° oscil·la més que per als altres dos casos. La freqüència sembla anar en augment a mida que augmentem l'angle de contacte, aquest fenomen és degut a que la bombolla al generar-se surt menys estirada i amb una menor longitud. Així doncs, podem observar com a mida que augmentem l'angle la longitud de les bombolles és major.

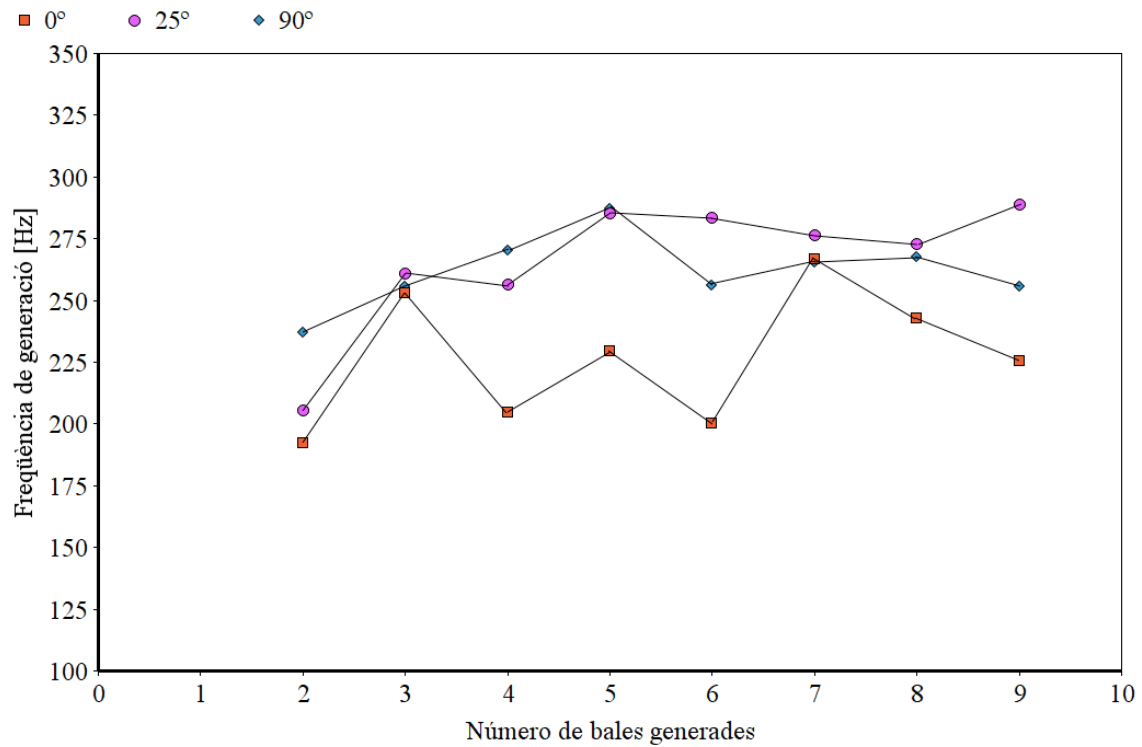


Fig 2.10. Freqüència de les bales en funció del número de bales generades.

En el cas de les tendències anteriors, cal també destacar que s'observa sempre una major diferència entre el cas de l'angle de 0° i els de 25° i 90° , això indica que els resultats de l'experiment en funció l'angle de contacte tenen una major sensibilitat per angles petits. És a dir, un augment en angles petits tindrà una major variació en els paràmetres que un augment en angles grans. Això és degut a que per angles grans, la velocitat amb la que entra l'aire s'oposa a aquesta condició a les parets del mur. Per exemple, un angle de 90° i un de 80° acabaran tenint pràcticament els mateixos efectes ja que la velocitat de l'aire variarà ràpidament la forma de la interfase (a excepció dels pocs nodes condicionats per l'angle prop del mur). Per altra banda entre un angle de 0° i un de 10° hi haurà gran variació, ja que al anar més en la direcció de la velocitat, afectaran més al resultat.

Un cop observades les tendències i les dependències que hi ha entre els tres paràmetres i l'angle de contacte, anem a comparar les dades amb dades experimentals prèviament publicades [1][6]. La Taula 2.3 mostra els valors obtinguts en les tres simulacions amb diferents angles de contacte i els valor obtinguts experimentalment en les mateixes condicions.

Experiment	f_G (Hz)	U_G (m/s)	L_G (mm)
Angle 0°	225.29	0.6645	1.581
Angle 25°	289.01	0.6579	1.559
Angle 90°	255.75	0.6536	1.529

Experimental	152.00	0.6844	2.538
---------------------	--------	--------	-------

Taula 2.3 Valors obtinguts en l'elecció de l'angle de contacte.

Com hem pogut observar, l'angle de contacte de 0° és el que millor representa els resultats experimentals, per tant l'angle de contacte escollit per al nostre estudi, serà l'angle de 0° .

3 RESULTATS

En aquest capítol presentarem els resultats obtinguts per als diferents experiments realitzats amb les nostres simulacions. Analitzarem cada paràmetre dels nostres resultats i el compararem amb caracteritzacions teòriques per tal de poder explicar així les tendències d'una manera raonada. Totes les caracteritzacions teòriques d'aquest treball es basen en el treball previ realitzat per Arias [5]. Aquesta comparació ens servirà per poder establir fins a quin punt la nostra simulació s'aproxima als anàlisis teòrics [5]. Analitzarem les tendències que segueixen un seguit de paràmetres en funció de la velocitat d'entrada del gas. Aquests paràmetres són: la velocitat de les bombolles, la fracció de volum d'aire, la freqüència de generació i les longituds característiques de la cel·la unitat.

La Figura 3.1 mostra el patró que segueixen les bombolles al generar-se. Amb aquesta configuració de velocitats hem aconseguit generar bales d'aire de diferents mides (amb molt poca dispersió de mida entre elles) i amb una gran regularitat en la freqüència de generació.



Fig 3.1. Patró de generació de les bales.

Per altra banda, cal dir les velocitats d'entrada del gas i del líquid que hem utilitzat en aquests experiments (velocitats U_{SL} i U_{SG}). Hem dit abans en totes les simulacions hem estat treballant en règim de bala. Les velocitats d'entrada del gas escollides per realitzar les simulacions han estat: 0.059m/s, 0.144m/s, 0.212m/s, 0.267m/s i 0.359m/s (extretes del treball d'Arias [1][6]).

3.1 Velocitat de la bala d'aire

Començarem expressant la velocitat de les bales d'aire en funció de la velocitat d'entrada de l'aire. La Figura 3.2 mostra les velocitats de les bales obtingudes en les simulacions en funció de la velocitat superficial mitjana de la mescla. Com es pot observar, la velocitat de les bombolles és més gran que la velocitat superficial de la mescla i augmenta linealment. Per tal de més tard poder comparar aquests resultats amb els d'experiments ja realitzats, representarem aquest caràcter lineal tal i com ha estat caracteritzat per Arias [5]:

$$U_G = C_0(U_{SL} + U_{SG}) = C_0(0.318 + U_{SG}) \quad (3.1)$$

Com es pot comprovar el caràcter lineal de l'expressió 3.1 també s'observa en els valors obtinguts per les simulacions, per tant serà idoni per caracteritzar els nostres valors. El coeficient C_0 ha de ser major a 1 per a condicions de microgravetat, ja que la bala d'aire anirà a més velocitat que el líquid. Aquest factor és degut a que el líquid estarà en tot moment en contacte amb el tub pel que la seva velocitat prop del tub tendirà a zero. En la figura s'ha representat la tendència lineal dels nostres resultats per tal d'extreure el valor del coeficient C_0 i poder caracteritzar aquest comportament. En aquest cas hem aconseguit un coeficient $C_0 = 1.13$.

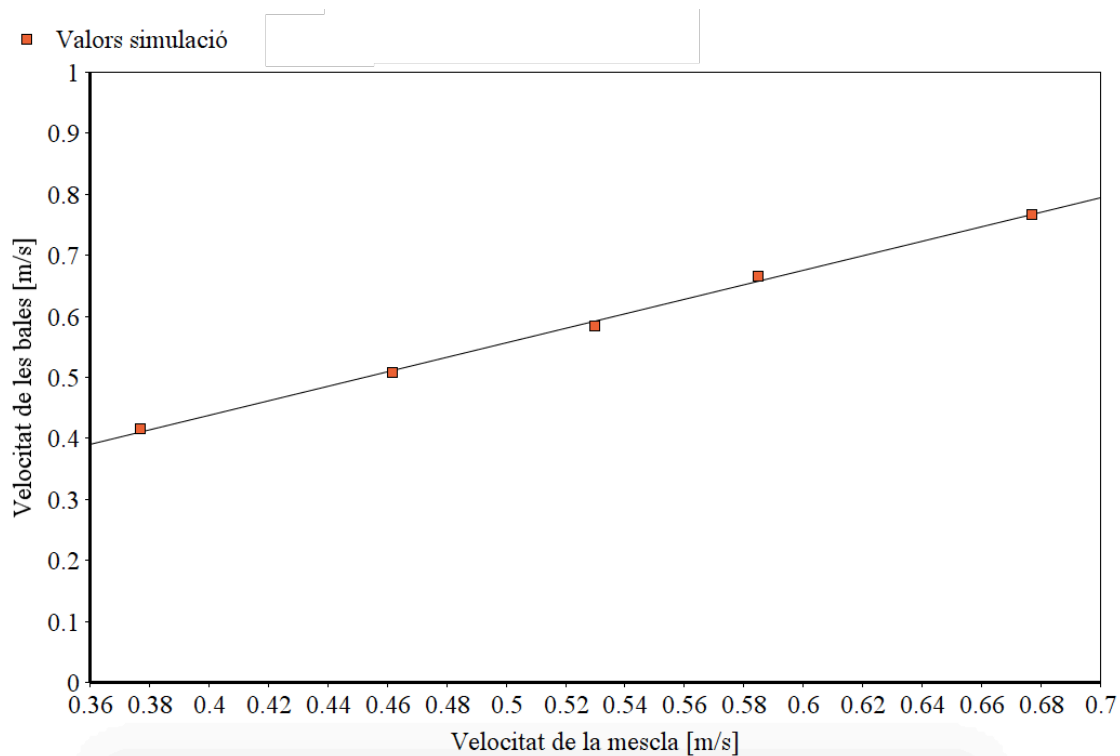


Fig 3.2. Velocitat de les bales en funció de la velocitat de la mescla.

Una altra dada que ens queda per analitzar en funció del rang de velocitat de les bombolles era el nombre de Weber de les nostres simulacions. En el nostre cas finalment aquest nombre ha variat entre $2.91 \cdot 10^{-3}$ i $9.99 \cdot 10^{-3}$ (veure secció 1.4.2).

3.2 Fracció de volum del gas

La Figura 3.3 mostra els valors de la fracció de volum d'aire mitjana en funció de la velocitat d'entrada del gas. Per tal de caracteritzar aquesta tendència obtinguda en les simulacions hem utilitzat un altre cop una caracterització ja realitzada anteriorment per Arias [5]; la fracció de volum d'aire mitjana en funció de la velocitat d'entrada del gas pot ser expressada com:

$$\alpha_m = \frac{U_{SG}}{U_G} \quad (3.2)$$

Els valors expressats en el gràfic són els valors obtinguts mitjançant les simulacions i els valors obtinguts a partir de la caracterització del coeficient C_0 . Les caracteritzacions teòriques realitzades per Arias [5] segueixen representant fidelment els nostres valors. En tots dos casos per tal de trobar la fracció de volum mitjana s'ha fet servir l'expressió 3.2. Els resultats de la fracció de volum, per altra banda, semblen ser lògics; ja que al augmentar la velocitat de l'aire augmentarà la quantitat d'aire en relació a la de líquid i per tant la fracció de volum d'aire augmentarà.

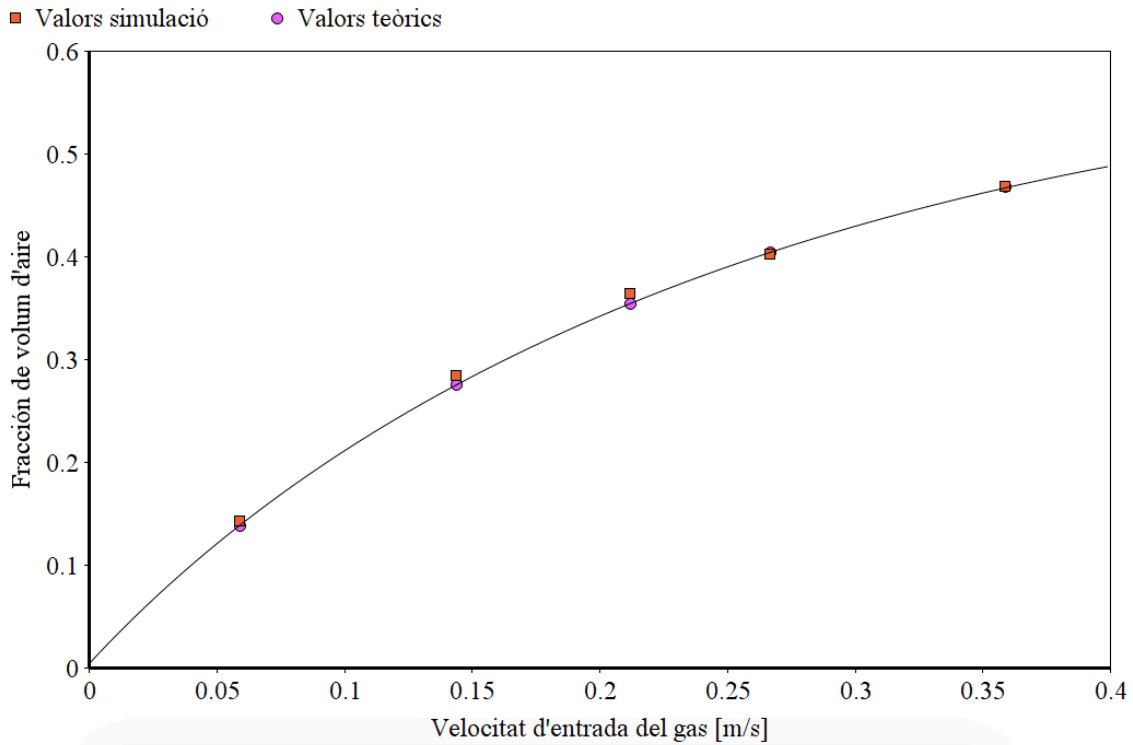


Fig 3.3. Fracció de volum d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas.

3.3 Freqüència de generació

Del treball previ realitzat per Arias [5] es pot extreure com la freqüència de generació en funció de la velocitat d'entrada d'aire té dues fases. Una primera fase lineal en que augmenta la freqüència a mida que augmentem la velocitat i una segona fase de saturació en que la freqüència es manté constant per a valors alts de U_{SG} .

Aquest comportament és degut a que al augmentar la velocitat d'entrada del gas la mida de les bales d'aire serà constant però augmentarà la freqüència de generació; ja que hi haurà més bombolles. A partir d'un punt de saturació la freqüència deixarà d'augmentar però la mida de les bales cada cop serà major. Això, és perquè el temps que trigarà el líquid en tallar la bombolla serà el mateix per tant la freqüència serà constant. En la Secció 3.4 (Longituds característiques) tractarem la mida de les bales d'aire.

La caracterització del comportament de la freqüència es pot caracteritzar segons Arias [5] en funció de quatre paràmetres característics:

1. Pendent inicial de la fase lineal (a).
2. Freqüència de saturació (f_{sat}).
3. Velocitat superficial del gas en el punt de transició entre les fases (U_{SGO}).
4. Escala de la transició entre les fases (ϵ).

Aquests quatre paràmetres poden ser relacionats entre ells tal com indica Arias [5] per tal d'obtenir la freqüència de generació en funció de la velocitat d'entrada del gas com:

$$f(U_{SG}) = f_{sat} - a \cdot \epsilon \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{U_{SG0} - U_{SG}}{\epsilon} \right) \right) \quad (3.3)$$

A continuació calcularem els valors dels quatre paràmetres per al nostre cas amb l'objectiu de caracteritzar els nostres valors en funció de U_{SG} .

3.3.1 Escala de la transició

Donat que els valors de ϵ i U_{SG0} no donen cap sentit físic a l'expressió, així com si que ho fan els valors de f_{sat} i a , hem de triar uns valors per tal de completar l'expressió. Per al cas del valor de ϵ , hem de seleccionar una velocitat superficial semblant a l'ordre de magnitud de les que estem realitzant. El valor escollit a sigut el mateix que Arias [5] en el seu estudi, el valor és el corresponent a un flux volumètric característic de $Q = 1 \text{ ml/min}$, això dona un valor de $\epsilon = 1/15\pi \text{ m/s}$.

3.3.2 Velocitat superficial del gas en el punt de transició

Per al valor de U_{SG0} unint les dues tendències lineals hem obtingut un valor de $U_{SG0} = 0.230 \text{ m/s}$. Cal destacar que amb aquesta aproximació, quan major sigui la diferència entre la U_{SG} a observar i U_{SG0} major serà la precisió de la predicció.

3.3.3 Freqüència de saturació

Un cop obtinguts els nostres resultats, ja podem extreure el valor de la freqüència de saturació. Per al nostre cas hem obtingut un valor de $f_{sat} = 212 \text{ Hz}$.

3.3.4 Pendent inicial de la fase lineal

Per calcular el paràmetre a simplement cal obtenir el pendent de la fase inicial, calculant-se de la següent manera:

$$a = \frac{f_{sat}}{U_{SG0}} \quad (3.4)$$

Per al nostre cas hem obtingut un valor de $a = 921.74 \text{ m}^{-1}$.

Un cop trobats tots aquests valors característics podem substituir-los a l'equació 3.3 i trobar l'expressió final que ens relacionarà la freqüència de generació de les bales d'aire amb la velocitat d'entrada d'aire:

$$f = 212 - 921.74/15\pi \cdot \ln\left(1 + \exp\left(\frac{0.230 - U_{SG}}{1/15\pi}\right)\right) \quad (3.5)$$

La Figura 3.4 mostra la comparació entre els valors de la nostra simulació i la tendència de la caracterització teòrica mitjançant l'equació 3.5. Com podem comprovar la caracterització de les nostres simulacions segueix essent molt acurada.

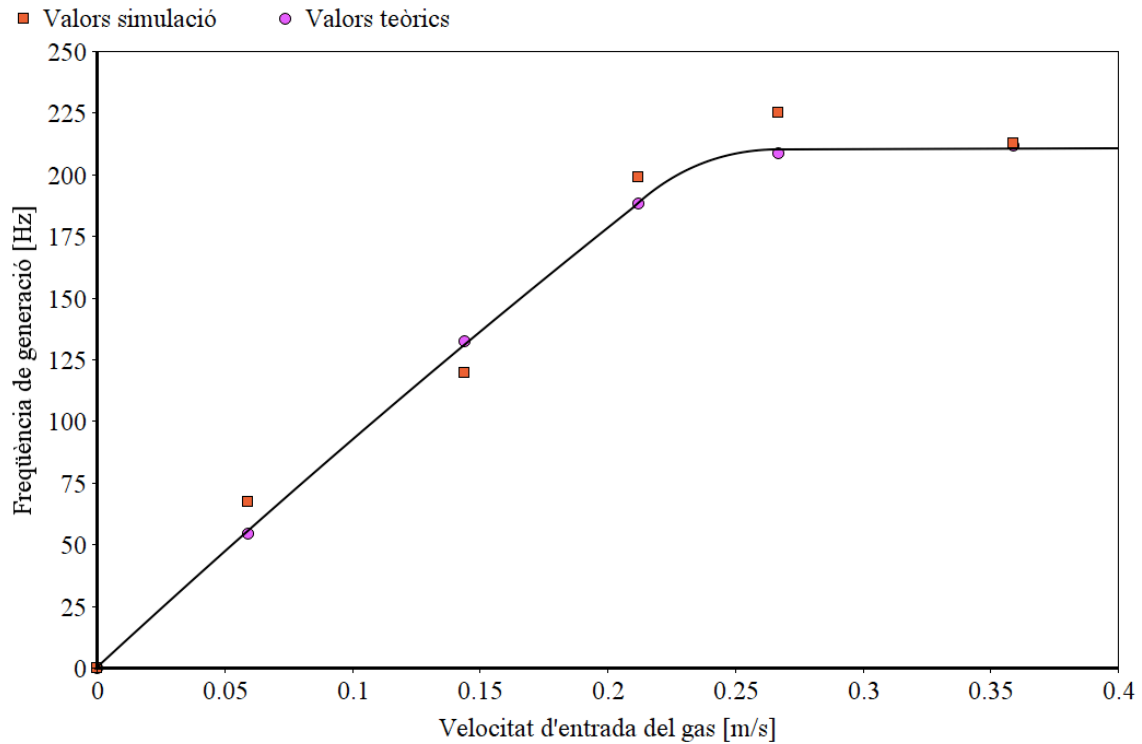


Fig 3.4. Freqüència de generació en funció de la velocitat d'entrada del gas.

3.4 Longituds característiques

Les bombolles no són perfectament cilíndriques dins del capil·lar. Les bales tenen una certa forma ovalada gràcies al fregament amb l'aigua i tenen una petita pel·lícula d'aigua entre elles i el capil·lar. Aquesta forma és deguda a la variació de velocitats al llarg del capil·lar. Com ens podem imaginar, la fase gasosa té una velocitat constant $C_0(U_{SL} + U_{SG})$ mentre que a mida que ens apropem a les parets del tub la velocitat de l'aigua tendeix ràpidament a zero.

Gràcies a això les velocitats del líquid prop del tub seran menors a les del gas i les del líquid pel centre del tub. Degut a aquesta forma, serà interessant analitzar quatre mides característiques dins la cel·la unitat:

1. Longitud de la cel·la unitat (L_{CU}).
2. Diàmetre equivalent de la bala d'aire (ϕ_B).
3. Longitud de la bala d'aire (L_B).
4. Longitud de la bala d'aigua (L_L).

3.4.1 Longitud de la cel·la unitat

La cel·la unitat es defineix com la bala d'aire i el líquid que hi ha entre el desprendiment d'una bala i el desprendiment d'altra. La Figura 3.5 mostra una cel·la unitat en una simulació.

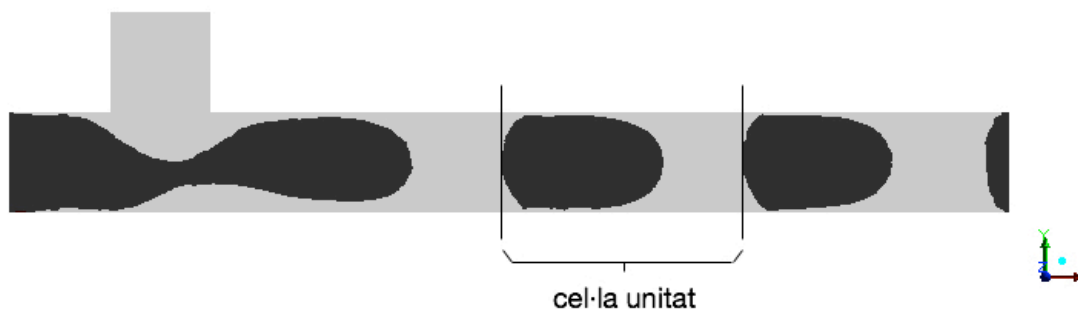


Fig 3.5. Representació d'una cel·la unitat.

A partir de l'estudi realitzat per Arias [5], sabem que el temps que triga en generar-se una cel·la unitat serà l'invers a la freqüència de generació de les bales d'aire. Durant aquest temps la cel·la unitat es desplaça una longitud L_{CU} a una velocitat mitjana U_G . Normalitzant L_{CU} amb el diàmetre del capil·lar segons Arias [5] obtenim la següent expressió:

$$\bar{L}_{CU} = \frac{U_G}{f\phi_c} = \frac{U_G}{f \cdot 10^{-3}} \quad (3.6)$$

La Figura 3.6 mostra la relació entre la longitud de la cel·la unitat mesurada en les simulacions i la longitud de la cel·la unitat obtinguda a partir de la caracterització teòrica usant les equacions 3.6 i 3.5.

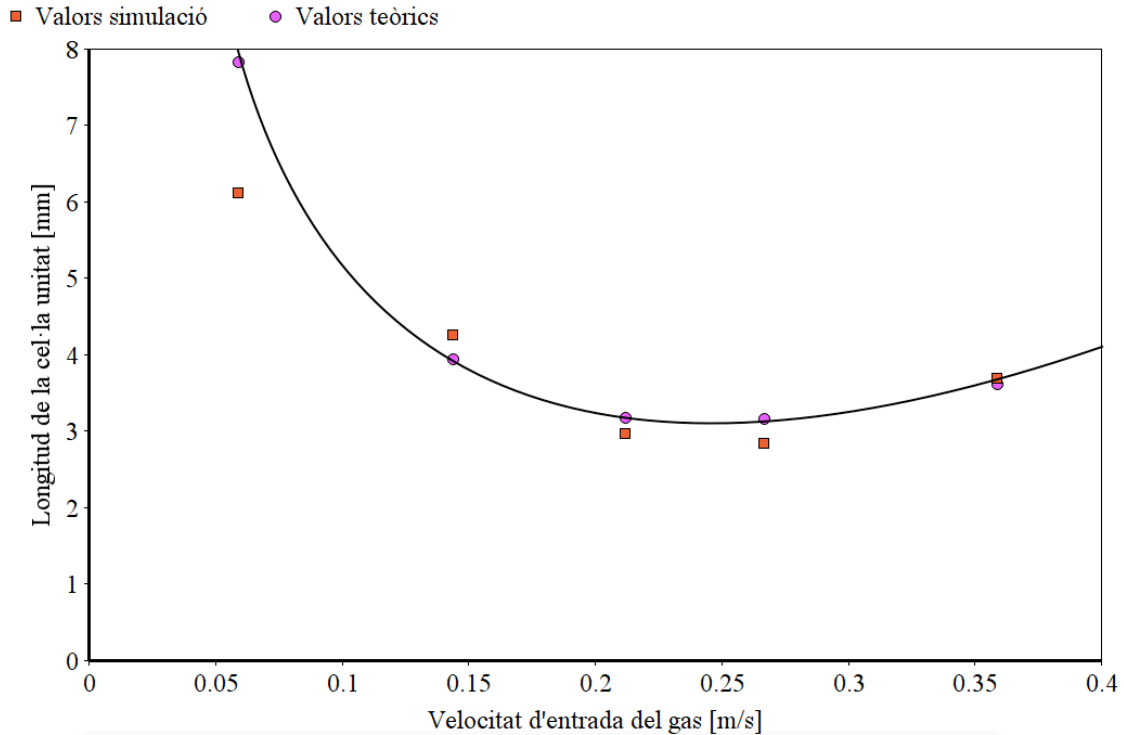


Fig 3.6. Longitud de la cel·la unitat en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Tal com mostra la figura anterior la caracterització és bastant acurada i els valors de la longitud de la cel·la unitat són bastant realistes i segueixen la tendència esperada. Com podem observar per a velocitats d'entrada del gas properes a zero la longitud de la cel·la unitat serà gran ja que al entrar-hi poc aire es formaran poques bombolles però amb bales d'aigua de gran longitud. Un cop augmenta aquesta velocitat augmentarà la freqüència de bombolles per tant la longitud de la cel·la unitat serà menor. Al arribar al punt de transició, com que les bales d'aigua seran de la mateixa mida però les bales d'aire cada cop seran més grans la longitud de la cel·la unitat tornarà a créixer.

3.4.2 Diàmetre equivalent de la bala d'aire

Quan una bombolla d'aire es forma en un capil·lar a mida que es faci més gran augmentarà de volum. Aquest augment de volum canviarà la seva forma quan sigui més gran que la secció circular del tub. La bombolla s'anirà allargant amb forma de bala pel capil·lar. Per tal de dimensionar la bala utilitzarem el seu diàmetre equivalent (ϕ_B). Aquest diàmetre és el diàmetre que tindria una esfera perfecte amb el mateix volum de la bala. A partir d'aquest raonament, Arias [5] aconsegueix relacionar el diàmetre equivalent de la bombolla d'aire normalitzat amb la seva freqüència de generació i la velocitat d'entrada de l'aire:

$$\bar{\phi}_B = \sqrt[3]{\frac{3 U_{SG}}{2 \phi_C f}} = \sqrt[3]{\frac{3 U_{SG}}{2 \cdot 10^{-3} f}} \quad (3.7)$$

La Figura 3.7 mostra un gràfic amb el diàmetre equivalent normalitzat en funció de la velocitat d'entrada del gas. El diàmetre equivalent s'ha calculat utilitzant l'expressió 3.7 per a les dades obtingudes en les simulacions i per a la caracterització de la freqüència de l'expressió 3.5. Per aquest cas la caracterització segueix reflectint el comportament de les nostres simulacions. Com ens podem imaginar diàmetres equivalents majors a 1 indicaran un règim de bala. Podem observar que mentre augmentem la velocitat del gas fins arribar a $U_{SG0} = 230 \text{ m/s}$ el diàmetre equivalent de les bombolles es manté constant i a partir d'aquest punt augmentarà de mida.

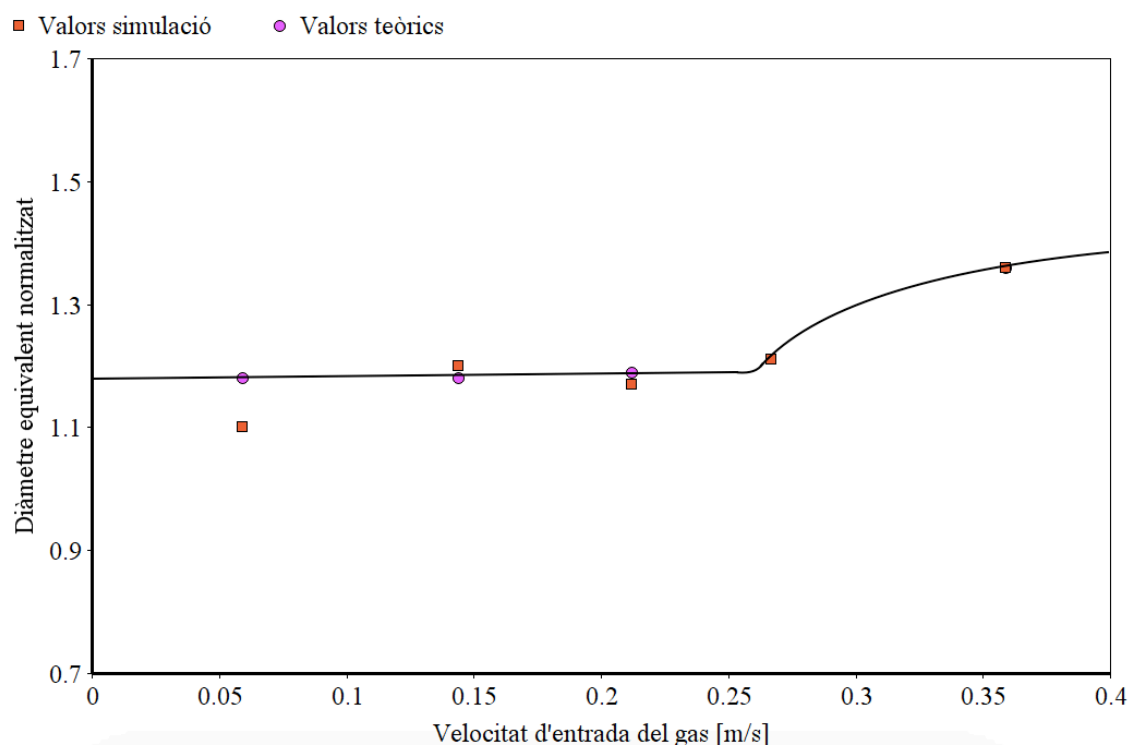


Fig 3.7. Diàmetre equivalent normalitzat en funció de la velocitat d'entrada del gas.

3.4.3 Longitud de la bala d'aire

A partir de l'expressió 3.6 usada per a calcular la longitud de la cel·la unitat i les deduccions realitzades en el document de Arias [5] podem extrapolar per a calcular la longitud de la bala d'aire que:

$$\bar{L}_B = C_0 \frac{U_{SG}}{f \phi_c} = 1.13 \frac{U_{SG}}{f \cdot 10^{-3}} \quad (3.8)$$

La Figura 3.8 mostra la relació entre la longitud de la bala d'aire i els valors de U_{SG} . La caracterització dels valors està representat a la figura amb els valors obtinguts a partir de l'expressió 3.8 i la freqüència obtinguda a partir d l'equació 3.5. Per altra banda, els valors mesurats en les simulacions són representats directament. Com es pot observar els valors per a algunes longituds de bales no és prou precís en les simulacions, aquest factor pot ser degut a fluctuacions en la bombolla degudes al desprendiment de la bala. Com podem comprovar experimentalment hem obtingut una longitud mínima de bombolla de 1.45mm, mentre que amb la caracterització de 1.25mm.

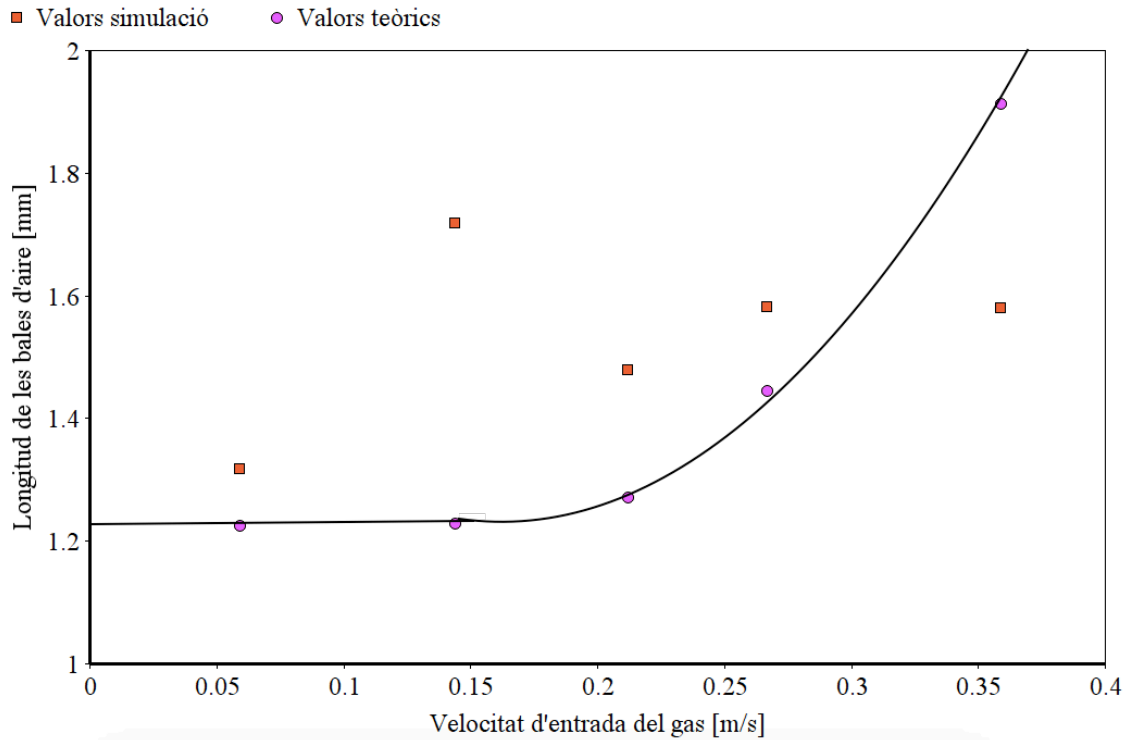


Fig 3.8. Longitud de les bales d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas.

3.4.4 Longitud de la bala d'aigua

A partir de l'expressió 3.6 usada per a calcular la longitud de la cel·la unitat i les deduccions realitzades en el document de Arias [5] podem extrapolar també per a calcular la longitud de la bala d'aigua que:

$$\bar{L}_L = C_0 \frac{U_{SL}}{f \phi_c} = 1.13 \frac{0.318}{f \cdot 10^{-3}} \quad (3.9)$$

La Figura 3.9 mostra la comparació entre la caracterització realitzada a partir de les expressions 3.9 i 3.5 i els resultats obtinguts experimentalment. Com es pot observar hi ha dos comportaments, un primer comportament en el que disminueix la longitud de la bala d'aigua a mida que augmentem la velocitat d'entrada del gas i una velocitat a partir de la qual la longitud de la bala es manté constant. La longitud de bala d'aigua mínima correspon a $L_L = 1.5mm$ tant en la caracterització com en les simulacions.

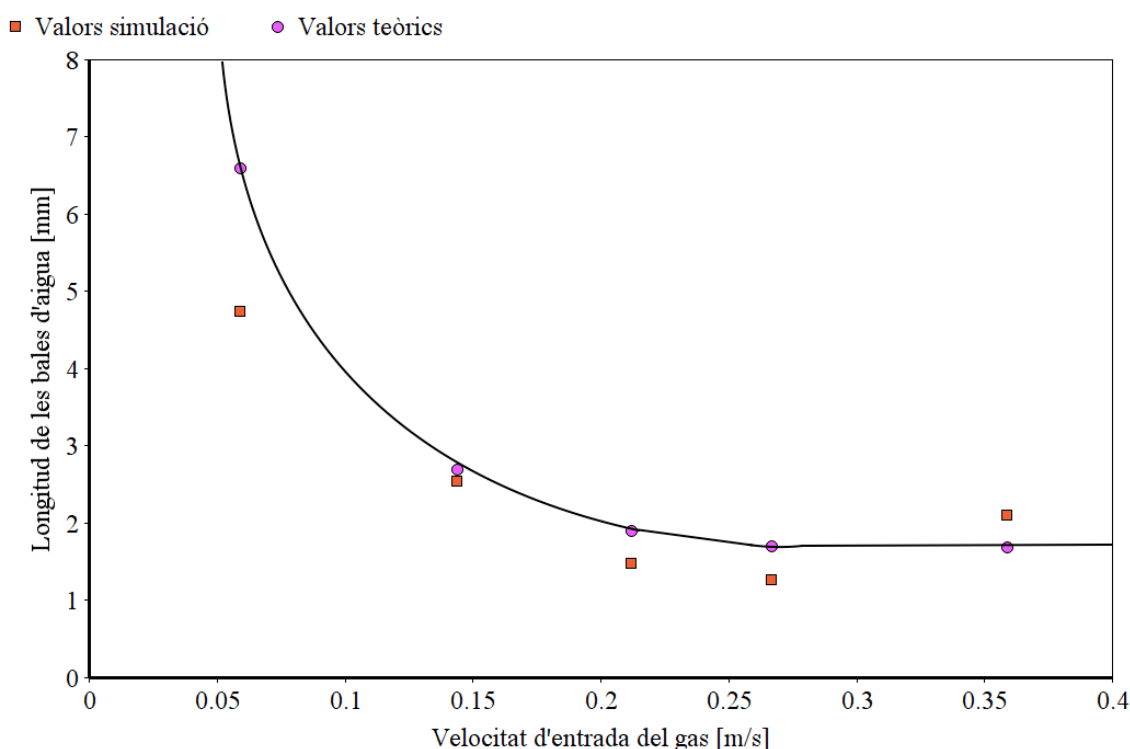


Fig 3.9. Longitud de les bales d'aigua en funció de la velocitat d'entrada del gas.

3.5 Taula caracteritzacions

A continuació la Taula 3.1 mostra totes les caracteritzacions i raonament teòrics que hem realitzat de les nostres simulacions en aquest capítol. Així sabem quins valors i tendències hem de comparar amb els resultats experimentals realitzats en el treball d'Arias[1][6]. Quan es tracta d'una tendència a comparar es mostra la relació que existeix entre els diferents paràmetres i la figura en que s'ha mostrat aquesta tendència. Totes les tendències representatives han

estat extreïdes del document d'Arias [5]. En canvi, quan es tracta del valor d'un paràmetre es mostra el valor d'aquest i la figura de la qual s'ha extret el valor.

Paràmetre	Nomenclatura	Tendència/Valor	Figura
Tendència de generació	Bala o bombolla	Bala	3.1
Velocitat de la bala d'aire	U_G	$U_G = C_0(U_{SL} + U_{SG})$	3.2
Coefficient de velocitats	C_0	1.13	3.2
Fracció de volum d'aire mitjana	α_m	$\alpha_m = \frac{U_{SG}}{U_G}$	3.3
Freqüència de generació	f	$f = f_{sat} - a \cdot \epsilon \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{U_{SGO} - U_{SG}}{\epsilon} \right) \right)$	3.4
Freqüència de saturació	f_{sat}	212 Hz	3.4
Pendent fase lineal	a	921.74 m^{-1}	3.4
Escala de la transició	ϵ	$1/15\pi \text{ m/s}$	3.4
Velocitat superficial de la transició	U_{SGO}	0.230 m/s	3.4
Longitud de la cel·la unitat	\bar{L}_{CU}	$\bar{L}_{CU} = \frac{U_G}{f \cdot 10^{-3}}$	3.5
Longitud de la bala d'aire	\bar{L}_B	$\bar{L}_B = 1.13 \frac{U_{SG}}{f \cdot 10^{-3}}$	3.7
Longitud de la bala d'aigua	\bar{L}_L	$\bar{L}_L = 1.13 \frac{0.318}{f \cdot 10^{-3}}$	3.8
Diàmetre equivalent	$\bar{\phi}_B$	$\bar{\phi}_B = \sqrt[3]{\frac{3 U_{SG}}{2 \cdot 10^{-3} f}}$	3.6

Longitud mínima de la bala d'aire	L_B	1.45 mm	3.7
Longitud mínima de la bala d'aigua	L_L	1.5 mm	3.8

Taula 3.1. Caracteritzacions dels resultats de les simulacions.

4 COMPARACIÓ DELS RESULTATS

Un cop exposats els resultats de les nostres simulacions compararem les tendències i els valors amb els obtinguts en experiments ja publicats per Arias [1][6]. Començarem comparant les tendències dels paràmetres per tal de comprovar que les relacions lògiques que hi ha en les simulacions són coherents amb els experiments. Un cop haguem validat les tendències compararem els valors obtinguts en tots dos casos per veure la proximitat que tenen les simulacions al comportament real. Finament, un cop comparades les tendències i els valors podrem concloure si les simulacions realitzades són realment acurades i vàlides per a estudis com el realitzat.

Abans de comparar les tendències hem de comprovar que en els dos casos hem treballat amb el mateix règim. Per tant començarem dient que les velocitats d'entrada que compararem han estat les mateixes, és a dir, una velocitat d'entrada del líquid constant de 0.318m/s i unes velocitats d'entrada del gas de: 0.059m/s, 0.144m/s, 0.212m/s, 0.267m/s i 0.359m/s.

Per als valors analitzats en els experiments també s'ha obtingut un règim de bala en totes les velocitats. Això, indica que per als dos casos ens trobem en el mateix règim d'estudi. Com es pot observar en la Figura 4.1 s'observa una comparació entre una imatge d'una simulació i una imatge d'un dels experiments. Com es pot observar la distribució de les bales és la mateixa. Les bales es deformen en els dos casos en conseqüència de la resistència del líquid.

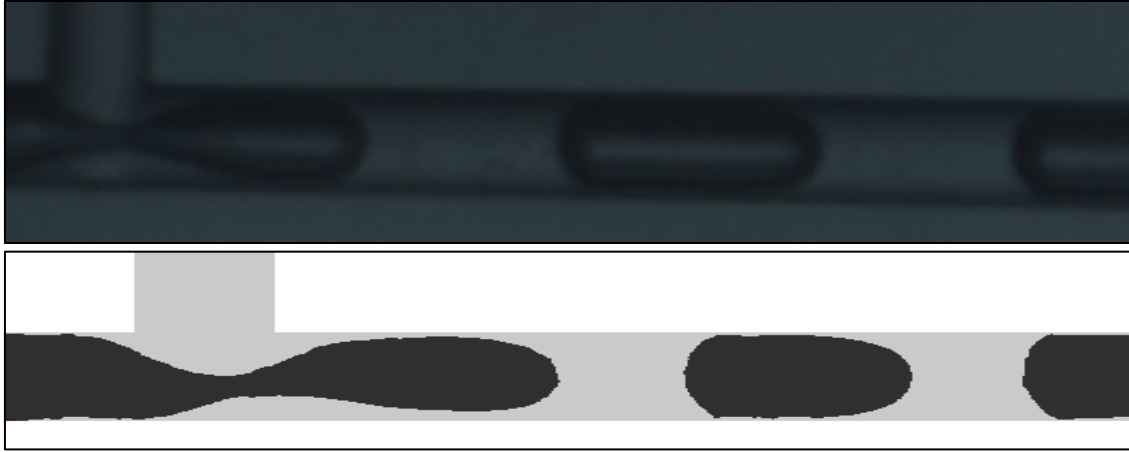


Fig 4.1. Comparació del patró de generació de bombolles. Font de la Figura 4.1 Superior: S. Arias.

Quatre paràmetres han estat analitzats en el Capítol 3 (Resultats): la velocitat de la bala d'aire, la fracció de volum d'aire mitjana, la freqüència de generació i les longituds característiques del flux. Per a cadascun d'aquests paràmetres hem obtingut la tendència en funció de la velocitat d'entrada del gas.

4.1 Velocitat de la bala d'aire

Per a la nostra simulació, hem obtingut que a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, s'augmentava la velocitat de la bala d'aire de manera lineal com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$U_G = C_0(U_{SL} + U_{SG}) \quad (4.1)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim la mateixa tendència. Una velocitat de bala que augmenta de manera lineal amb la velocitat d'entrada del gas. La Figura 4.2 mostra la velocitat de la bala en funció de la velocitat de la mescla per als resultats experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació. Com es pot observar la tendència mostrada aconsegueix perfectament amb el que les nostres simulacions havien previst.

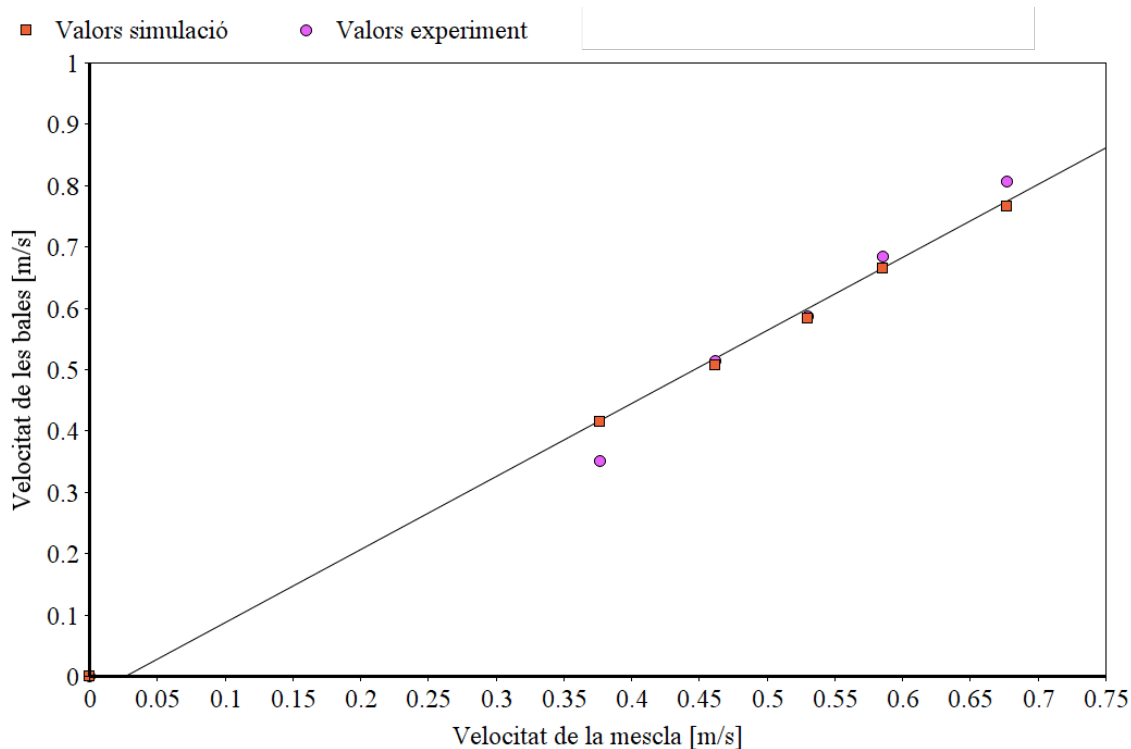


Fig 4.2. Velocitat de les bales en funció de la velocitat de la mescla.

Un cop validada la tendència compararem els valors del coeficient C_0 en tots dos casos. Per el cas de les simulacions hem obtingut un valor de $C_0 = 1.13$ mentre que pels resultats experimentals hem obtingut un valor de $C_0 = 1.19$. Com es pot comprovar la diferència en tots dos casos és mínima (error relatiu del 5%). Aquesta diferència acredita que per a calcular la velocitat de les bales les nostres simulacions han estat acurades.

4.2 Fracció de volum d'aire mitjana

Per a la nostra simulació, hem obtingut que a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, s'augmentava la fracció de volum d'aire mitjana de manera logarítmica, és a dir, cada cop havíem d'augmentar més la velocitat d'entrada del gas per a obtenir el mateix augment en la fracció de volum d'aire mitjana com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$\alpha_m = \frac{U_{SG}}{U_G} \quad (4.2)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim la mateixa tendència. Una fracció de volum d'aire que augmenta de manera logarítmica amb la velocitat d'entrada del gas. La Figura 4.3 mostra la fracció de volum d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas per als resultats

experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació. Com es pot observar la tendència mostrada aconsegueix perfectament amb el que les nostres simulacions havien previst.

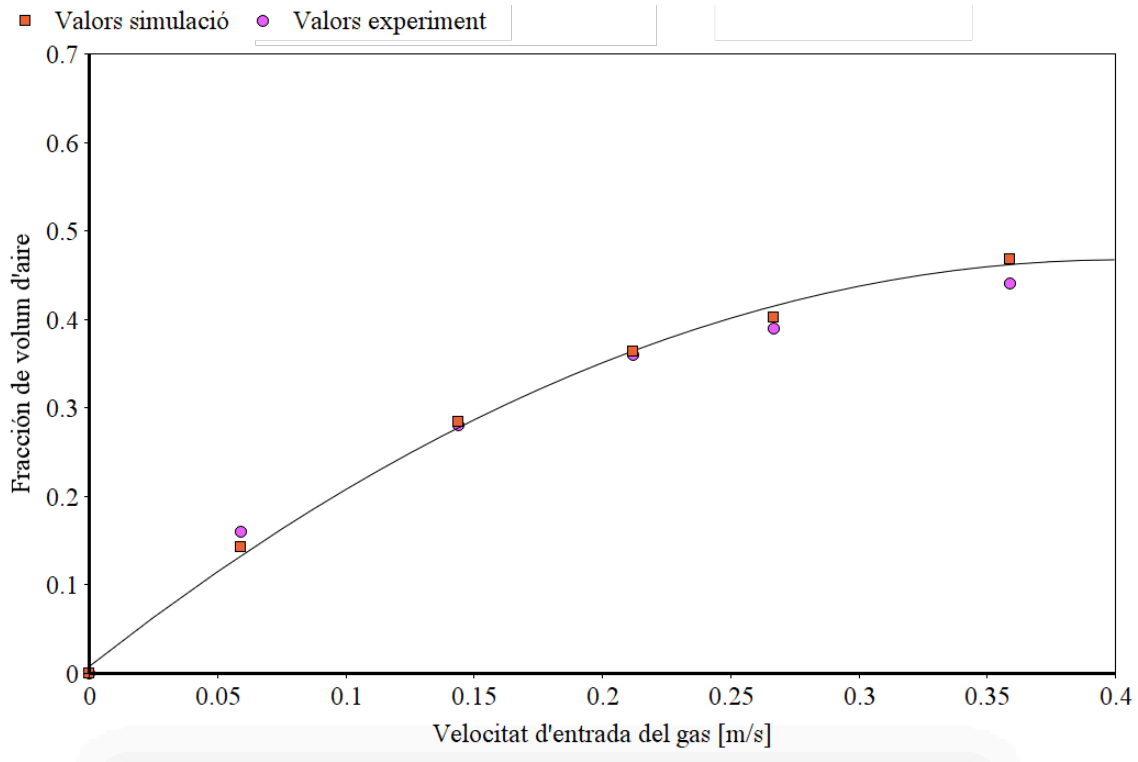


Fig 4.3. Fracció de volum d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Un cop validada la tendència compararem els valors obtinguts en tots dos casos. Per el cas de les simulacions hem obtingut uns valors molt semblants als obtinguts pels resultats. Com es pot comprovar la diferència entre tots dos casos és mínima (error relatiu inferior al 5% per a tots els valors). Aquesta diferència acredita que per a calcular la fracció de volum d'aire les nostres simulacions han estat acurades.

4.3 Freqüència de generació

Per a la nostra simulació, hem obtingut que a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, s'augmentava la freqüència de generació de manera lineal fins a arribar a una freqüència de saturació a partir de la qual per molt que augmentéssim la velocitat d'entrada del gas no augmentava com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$f(U_{SG}) = f_{sat} - a \cdot \epsilon \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{U_{SGO} - U_{SG}}{\epsilon} \right) \right) \quad (4.3)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim una tendència més lineal. Això, és degut a que per aquest valors de velocitats d'entrada del gas en els experiments encara no s'ha arribat a la freqüència de generació. Coneixent els resultats experimentals per a velocitats d'entrada del gas majors, podem afirmar que també s'arriba a una freqüència de saturació, però no s'observa la tendència en el gràfic. Tot i això, podem afirmar que la tendència és la mateixa que per a les simulacions. La Figura 4.4 mostra la freqüència de generació en funció de la velocitat d'entrada del gas per als resultats experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació.

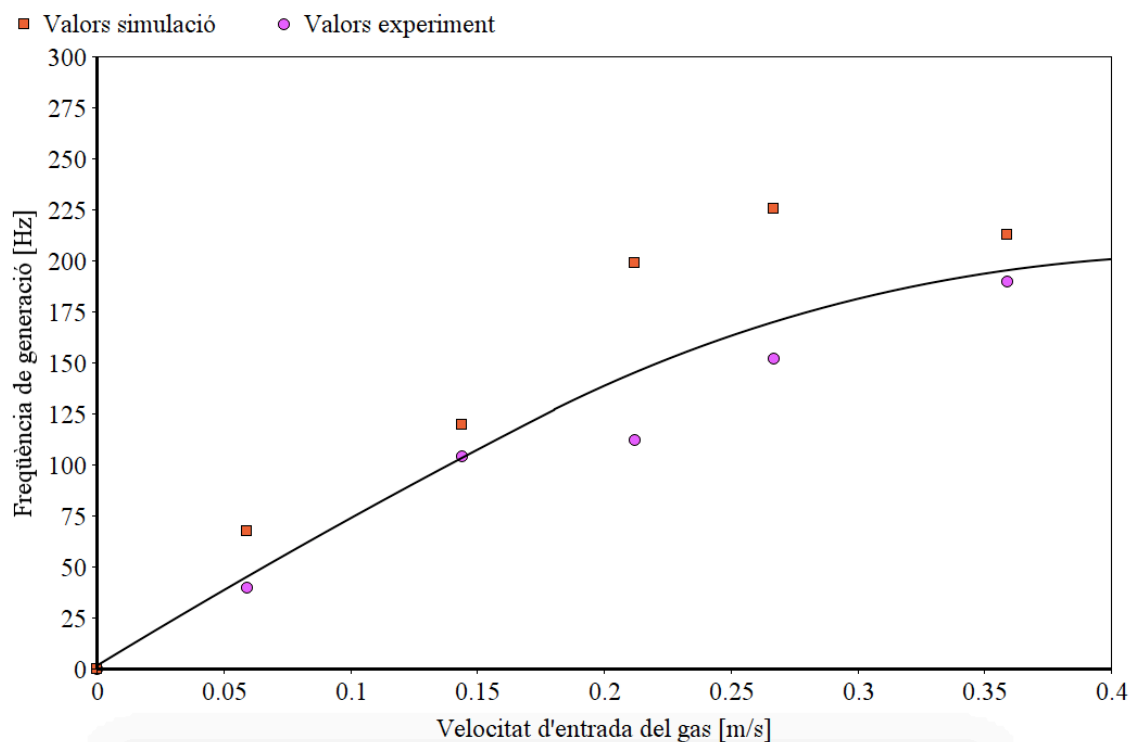


Fig 4.4. Freqüència de generació en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Un cop validada la tendència compararem els valors escollits per caracteritzar la freqüència de generació en tots dos casos. Per el cas de les simulacions hem obtingut uns valors de $a = 921.74 \text{ m}^{-1}$, $\epsilon = 1/15\pi \text{ m/s}$, $f_{sat} = 212 \text{ Hz}$ i $U_{SGO} = 0.230 \text{ m/s}$ mentre que pels resultats experimentals hem obtingut uns valors de $a = 1074.32 \text{ m}^{-1}$, $\epsilon = 1/15\pi \text{ m/s}$, $f_{sat} = 228.83 \text{ Hz}$ i $U_{SGO} = 0.213 \text{ m/s}$. Com es pot comprovar la diferència en tots dos casos és mínima. Aquesta

diferència acredita que per a calcular la freqüència de generació de les bales les nostres simulacions indiquen correctament la seva però no són del tot acurades.

4.4 Longituds característiques

Per al cas de les longituds característiques tres tendències diferents hem obtingut. Depèn si analitzem la longitud de la bala d'aire, la longitud de la bala d'aigua o la longitud de la cel·la unitat.

4.4.1 Longitud de la cel·la unitat

Per a la nostra simulació, hem obtingut que a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, disminuïa la longitud de la cel·la unitat fins arribar a un mínim en la velocitat de transició (U_{SG0}) i després augmentava un altre cop com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$\bar{L}_{CU} = \frac{U_G}{f\phi_C} = \frac{U_G}{f \cdot 10^{-3}} \quad (4.4)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim la mateixa tendència. Una longitud de cel·la unitat que disminueix fins un mínim i després augmenta amb la velocitat d'entrada del gas. La Figura 4.5 mostra la longitud de la cel·la unitat en funció de la velocitat d'entrada del gas per als resultats experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació. Com es pot observar la tendència mostrada aconsegueix perfectament amb el que les nostres simulacions havien previst.

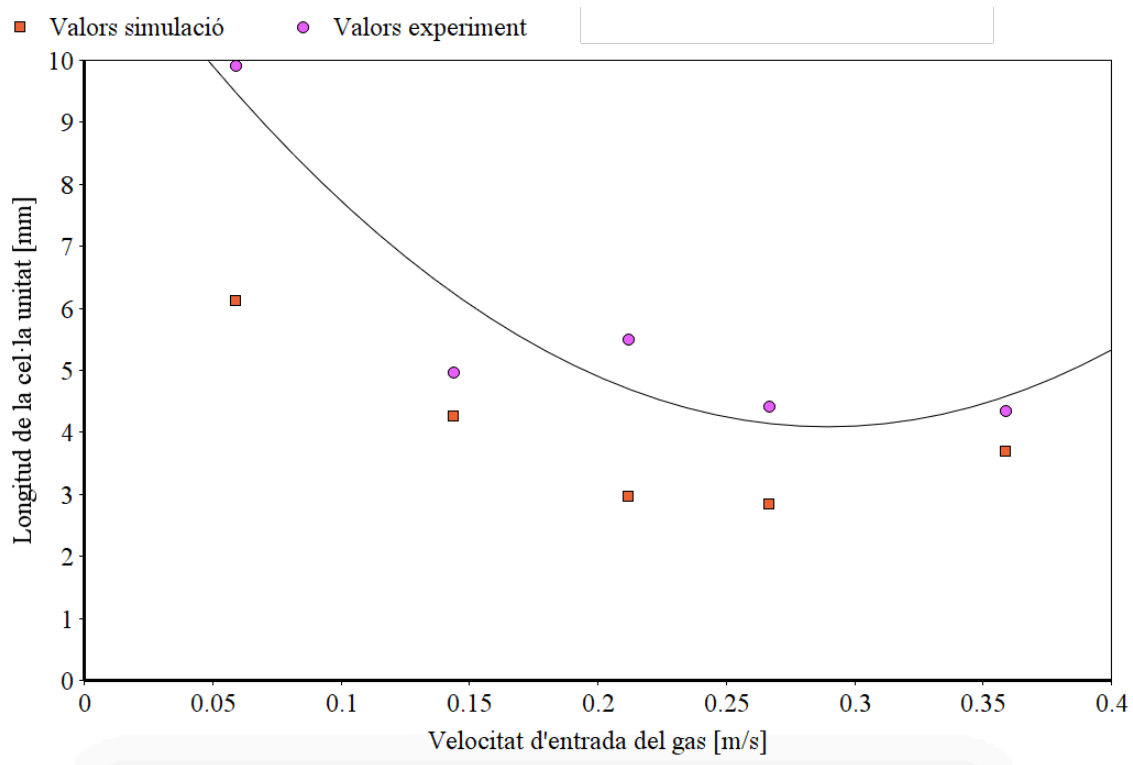


Fig 4.5. Longitud de la cel·la unitat en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Pel que fa als valors, les longituds en el cas dels resultats experimentals semblen ser majors. Observarem el perquè analitzant les longituds de bala d'aire i d'aigua.

4.4.2 Longitud de la bala d'aire

Per a la nostra simulació, no hem obtingut una relació tan fidel como amb els altres paràmetres. Tot i així, teòricament a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, la longitud de la bala d'aire es mantenia constant fins a arribar a la velocitat de transició (U_{SG0}) en que començava a augmentar com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$\bar{L}_B = C_0 \frac{U_{SG}}{f \phi_c} = 1.13 \frac{U_{SG}}{f \cdot 10^{-3}} \quad (4.5)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim la mateixa tendència que per a la caracterització. Una longitud de bala d'aire que es manté constant en un mínim i després augmenta amb la velocitat d'entrada del gas a partir de la velocitat de transició. La Figura 4.6 mostra la longitud de la bala d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas per als resultats experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació.

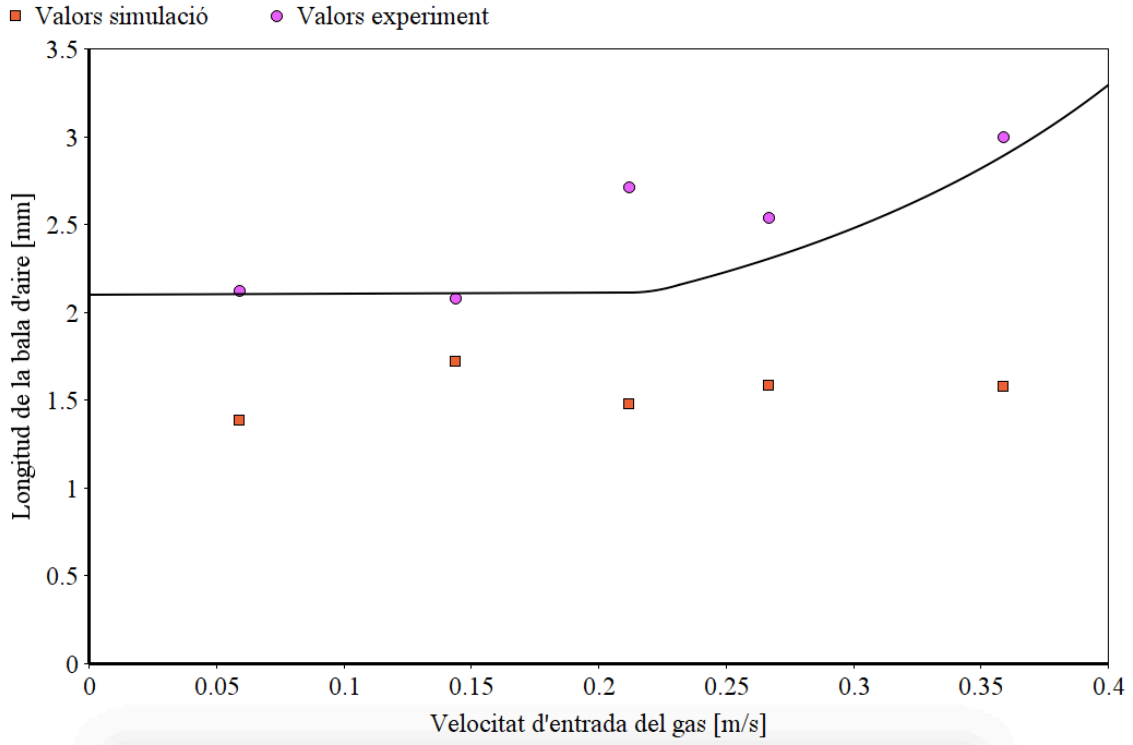


Fig 4.6. Longitud de les bales d'aire en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Un cop validada la tendència compararem els valors de la longitud de bala mínima L_B en tots dos casos. Per el cas de les simulacions hem obtingut un valor de $L_B = 1.45 \text{ mm}$ mentre que pels resultats experimentals hem obtingut un valor de $L_B = 2.20 \text{ mm}$. Aquesta diferència mostra el perquè la longitud de la cel·la unitat és diferent per al cas experimental. Com es pot comprovar la diferència per a tots dos casos és més gran que en els anteriors paràmetres. Aquesta diferència pot ser produïda per fluctuacions en les bombolles al ser mesurades. Tot i això, aquest resultat ens indica que per tal de conèixer l'ordre de magnitud d'aquest paràmetre les nostres simulacions són correctes, però, necessitaríem d'una precisió major en la simulació per a conèixer les longituds de bala del aire.

4.4.3 Longitud de la bala d'aigua

Per a la nostra simulació, hem obtingut que a mida que augmentàvem la velocitat d'entrada del gas, la longitud de la bala d'aigua disminuïa fins a arribar a una longitud mínima per a la velocitat de transició (U_{SG0}) com en la caracterització teòrica trobada per Arias [5]:

$$\bar{L}_L = C_0 \frac{U_{SL}}{f \phi_c} = 1.13 \frac{0.318}{f \cdot 10^{-3}} \quad (4.6)$$

Per el cas dels resultats experimentals realitzats per Arias [1][6] obtenim la mateixa tendència. Una longitud de bala d'aire que disminueix fins a la velocitat de transició i es manté en un mínim a partir d'allà. La Figura 4.7 mostra la longitud de la bala d'aigua en funció de la velocitat d'entrada del gas per als resultats experimentals i els de les simulacions. En la figura està representada la línia de tendència que segueixen els valors experimentals per tal de poder-los comparar amb els valors de la simulació. Veient aquest gràfic, podem afirmar que la tendència mostrada aconsegueix perfectament amb el que les nostres simulacions havien previst.

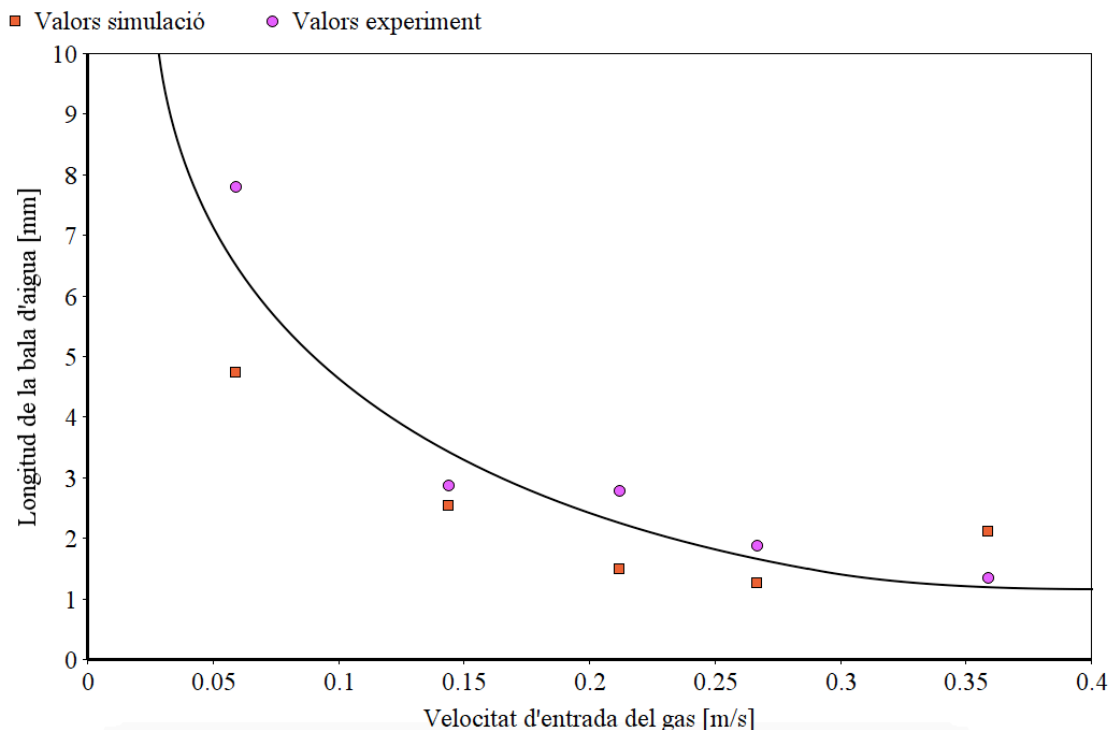


Fig 4.7. Longitud de les bales d'aigua en funció de la velocitat d'entrada del gas.

Un cop validada la tendència compararem els valors de la longitud de bala mínima L_L en tots dos casos. Per el cas de les simulacions hem obtingut un valor de $L_L = 1.5 \text{ mm}$ mentre que pels resultats experimentals hem obtingut un valor de $L_L = 1.4 \text{ mm}$. Com es pot comprovar la diferència en tots dos casos és mínima (error relatiu del 6%). Aquesta diferència acredita que per a calcular la longitud de les bales d'aigua les nostres simulacions han estat acurades.

5 CONCLUSIONS

En aquest document hem realitzat un estudi de la viabilitat d'unes simulacions numèriques sobre un flux bifàsic en condicions de microgravetat.

Concretament, la mescla d'aire i d'aigua en un capil·lar en forma de T en absència de gravetat. Per tal d'acomplir els nostres objectius hem definit tots els paràmetres per a les simulacions numèriques i hem realitzat els tests de convergència a aquells que ho requerien. Una vegada validades les nostres simulacions hem realitzat l'estudi. En aquest treball s'ha estudiat la dependència de diferents paràmetres amb la velocitat d'entrada del aire. Un cop obtinguts aquests valors, els hem comparat amb caracteritzacions teòriques realitzades per Arias [5] i amb resultats obtinguts en experiments reals ja publicats per Arias [1][6].

A partir de tot aquest procediment hem aconseguit conclusions en tres àmbits de treball diferents. Primerament, hem aconseguit conèixer i endinsar-nos en el món de les simulacions numèriques i comprovar la importància de l'elecció dels paràmetres. A partir d'aquí hem obtingut uns resultats que ens han portat a concloure quins han sigut els valors i tendències del nostre estudi en comparació amb les caracteritzacions realitzades per Arias [5]. I, finalment, podem també argumentar i discutir sobre la comparació realitzada amb els experiments ja realitzats per Arias [1][6].

Pel que fa a les simulacions numèriques, hem hagut d'escollir diferents paràmetres que ens han servit per adonar-nos de la gran quantitat de factors dels que pot dependre una simulació numèrica. Factors com ara el model de simulació (veure secció 1.9). Tots els models tenen el mateix objectiu, que és ser el més acurats possible respecte a la realitat. Tot i així, utilitzant diferents models obtindràs diferents resultats. Això fa que haguem de caracteritzar el nostre problema i escollir quin model pot representar millor el nostre experiment.

Per tal de realitzar unes simulacions numèriques cal prestar tanta atenció en la configuració de les pròpies simulacions com en l'experiment a realitzar posteriorment. Ja que els valors que escollim en aquest moment ens determinen els resultats del nostre treball. Això reflecteix la importància d'un bon estudi preliminar. Un cop escollida la configuració, hem procedit a realitzar uns tests de convergència per validar alguns dels valors escollits. Valors com el salt temporal, el nombre d'elements de la malla i l'angle de contacte. Per tal d'escollir aquests valors s'ha de triar els que reflecteixin millor la realitat però tenint en compte també el temps de processament. Aquest és un dels punts més importants en les simulacions, escollir entre valors propers als reals però amb un temps de processament major o valors menys acurats però amb un temps de processament menor.

A partir de les nostres simulacions numèriques realitzades hem extret dues principals conclusions. Una primera conclusió és que la importància de realitzar un bon estudi previ sobre l'experiment i d'escollir una bona configuració per a les simulacions numèriques és essencial per a l'èxit de les simulacions. I, per acabar, que s'ha de valorar i escollir els paràmetres de la simulació en funció del temps de processament que comporten.

Per altra banda, un com hem realitzat les simulacions i hem analitzat la dependència dels paràmetres a estudiar amb la velocitat d'entrada del gas hem

obtingut unes tendències i uns valors que hem pogut comparar amb les caracteritzacions teòriques realitzades per Arias [5]. Tendències per a la velocitat de les bombolles, la freqüència de generació, les longituds característiques i la fracció de volum d'aire mitjana.

Aquestes tendències i valors ens han demostrat que les simulacions segueixen la lògica de les previsions teòriques. I, les relacions directes entre la velocitat d'entrada del gas i aquests paràmetres són les correctes. També, hem pogut observar una relació directa entre els paràmetres que hem estudiat. Tots aquest paràmetres a nivell físic en l'experiment estan connectats i són dependents entre ells. Per exemple, la fase lineal de la freqüència s'explica gràcies a la longitud de les bales d'aire constants i a la disminució de la longitud de les bales d'aire.

A partir d'aquest punt hem comparat els valors amb els dels experiments ja realitzats per Arias [1][6]. Comparant les nostres tendències amb els dels experiments hem pogut comprovar com les tendències de les simulacions i els experiments són molt semblants i coherents. Tot i així, hi ha valors que no encaixen perfectament. La qual cosa, ens fa concloure que les simulacions són una gran aproximació de la realitat i poden servir per tal d'estudiar relacions i tendències però sempre amb cura d'haver realitzat un bon estudi previ i una configuració apropiada pel cas a estudiar. En aquest cas, una de les últimes conclusions de l'estudi és que per millorar la fiabilitat de les simulacions seria recomanable disminuir el salt temporal, ja que és un dels paràmetres que més han influenciat en l'error del nostre experiment. Un dels elements clau alhora de concloure això és que la longitud de les bales d'aire mesurada en els experiments no concorda amb la longitud de les bales d'aire mesurada en les simulacions.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Arias, S., Legendre, D., and González-Cinca, R., 'Numerical simulation of bubble generation in a T-junction', *Computers & Fluids*, 56, 2012, pp. 49-60.
- [2] ANSYS Academic Research, Release 16.2, Help System, ANSYS, Inc, 2015.
- [3] K.S. Rezkallah. Weber number based flow-pattern maps for liquid-gas flows at microgravity. *J. Multiphase Flow*, 22 (6):1265–1270, 1996.
- [4] Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H., 'On the partial Difference Equations of Mathemaical Physics', *IBM Journal*, March 1967.
- [5] Arias, S., 'An analysis of two-phase flows in conditions relevant to microgravity', 2011
- [6] Arias, S., González-Cinca, R., Ruiz, X., Ramírez-Piscina, L., Casademunt, J., 'Characterization of the performance of a minibubble generator in conditions relevant to microgravity', *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*,

365, 2010, pp. 52-55.

[7] J. Carrera, X. Ruiz, L. Ramírez-Piscina, J. Casademunt, and M. Dreyer. Generation of a monodisperse microbubble jet in microgravity. *AIAA Journal*, 46:2010–1019, 2008.



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANNEXOS

TÍTOL DEL TFG: Comparació entre dades de simulacions numèriques 3D i experimentals en el procés de generació d'un tren gas-líquid en un capil·lar en forma de "T".

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria d'Aeronavegació

AUTOR: Isaac Hernández Monclús

DIRECTOR: Santiago Arias Calderón

CODIRECTORA: Adeline De Villardi De Montlaur

DATA: 24 d'octubre del 2016

7 ANNEX 1. Codi *MATLAB*

% Lectura del arxiu x=8mm:

```
clear all
load surf_mon_8.dat
ref=surf_mon_8;
```

% Àrea d'1mm:

```
area=pi*((1e-3)/2)^2;
```

% Fracció de volum d'aigua:

```
wref = 2*ref(:,2)./area;
```

% Fracció de volum d'aire:

```
airref = 1-wref;
```

% Temps:

```
tref=ref(:,1);
```

% Lectura dels punts d'inici i final de bombolla:

```
i=1;
k=1;
init=true;
valor=0.0015;
while(i<=length(airref))
    done=false;
    if(airref(i)>=valor&&init==true)
        points(k)=i;
        k=k+1;
        init=false;
        done=true;
    end
    if(airref(i)<=valor&&init==false&&done==false)
        points(k)=i;
        k=k+1;
        init=true;
    end
    i=i+1;
end
```

% Eliminació punts imparells:

```
if(rem(length(points),2)==1)
    points(k-1)=[];
end
```

% Separació punts inicials i finals:

```
i=1;
k=1;
while(i<=length(points))
```



```

    ipoints(k)=points(i);
    i=i+1;
    fpoints(k)=points(i);
    i=i+1;
    k=k+1;
end

```

% Àrea bombolles:

```

i=1;
while(i<=length(ipoints))
    a(i)=trapz(tref(ipoints(i):fpoints(i)),airref(ipoints(i):fpoints(i)));
    av(i)=a(i)*area;
    i=i+1;
end

```

% Eliminació bombolles petites (errades simulació):

```

i=1;
while(i<=length(av))
    if(av(i)<=10e-11)
        fpoints(i)=[];
        ipoints(i)=[];
        av(i)=[];
        a(i)=[];
        i=i-1;
    end
    i=i+1;
end

```

% Freqüència:

```

i=1;
while(i<=length(ipoints)-1)
    pi(i)=tref(ipoints(i+1))-tref(ipoints(i));
    fi(i)=1/pi(i);
    i=i+1;
end

```

% Lectura del arxiu x=7mm:

```

load surf_mon_7.dat
ref7=surf_mon_7;

```

% Fracció de volum d'aigua:

```

wref7 = 2*ref7(:,2)./area;

```

% Fracció de volum d'aire:

```

airref7 = 1-wref7;

```

% Temps:

```

tref7=ref7(:,1);

```

% Lectura dels punts d'inici i final de bombolla:

```
i=1;
k=1;
init=true;
valor=0.0015;
while(i<=length(airref7))
    done=false;
    if(airref7(i)>=valor&&init==true)
        points7(k)=i;
        k=k+1;
        init=false;
        done=true;
    end
    if(airref7(i)<=valor&&init==false&&done==false)
        points7(k)=i;
        k=k+1;
        init=true;
    end
    i=i+1;
end
```

% Eliminació punts imparells:

```
if(rem(length(points7),2)==1)
    points7(k-1)=[];
end
```

% Separació punts inicials i finals:

```
i=1;
k=1;
while(i<=length(points7))
    ipoints7(k)=points7(i);
    i=i+1;
    fpoints7(k)=points7(i);
    i=i+1;
    k=k+1;
end
```

% Àrea bombolles:

```
i=1;
while(i<=length(ipoints7))
    a7(i)=trapz(tref(ipoints7(i):fpoints7(i)),airref(ipoints7(i):fpoints7(i)));
    av7(i)=a7(i)*area;
    i=i+1;
end
```

% Eliminació bombolles petites (errades simulació):

```
i=1;
while(i<=length(av7))
    if(av7(i)<=10e-11)
        fpoints7(i)=[];
    end
end
```

```

        ipoints7(i)=[];
        av7(i)=[];
        a7(i)=[];
        i=i-1;
    end
    i=i+1;
end

```

% Velocitat bombolles:

```

i=1;
while(i<=length(ipoints))
    tbetween(i)=tref(ipoints(i))-tref7(ipoints7(i));
    Ug(i)=1e-3/tbetween(i);
    i=i+1;
end

```

% Longitud bombolles:

```

i=1;
while(i<=length(ipoints))
    tbubbles(i)=tref(fpoints(i))-tref(ipoints(i));
    L(i)=Ug(i)*tbubbles(i);
    i=i+1;
end

```

% Plotejar:

```

figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(tref,airref,'g-')
xlabel('time [s]')
ylabel('fraction of air')
title('x=0.008m')

subplot(2,2,2)
plot(fi)
xlabel('bubble')
ylabel('frequency [Hz]')
axis([1,8,0,300])

subplot(2,2,3)
plot(L)
xlabel('bubble')
ylabel('longitude [m]')
axis([1,9,0,0.003])

subplot(2,2,4)
plot(Ug,'-r')
xlabel('bubble')
ylabel('velocity [m/s]')
axis([1,9,0,0.8])

```